

中空軸を持つ一軸浮上制御磁気軸受の提案とその評価に関する研究

著者	廣瀬 健太郎
発行年	2016-07
その他のタイトル	Proposal and an Evaluation of One Axis Controlled Magnetic Bearing with a Hollow Shaft
学位授与年度	平成28年度
学位授与番号	17104甲工第427号
URL	http://hdl.handle.net/10228/5974

中空軸を持つ一軸浮上制御磁気軸受の提案と
その評価に関する研究

廣瀬 健太郎

九州工業大学大学院平成 28 年度博士論文

中空軸を持つ一軸浮上制御磁気軸受の提案と
その評価に関する研究

所属 九州工業大学大学院 工学府

先端機能システム工学専攻

指導教官 小森望充 教授

学籍番号 12590903

提出者 廣瀬健太郎

提出日 平成 28 年 7 月

目次

論文要旨	1
第 1 章 序論	3
1.1 従来技術	3
1.2 非接触技術	5
1.3 磁力を用いない非接触浮上	7
1.4 磁気軸受の応用	7
1.5 軸流型磁気軸受	12
1.6 磁気軸受の課題	14
1.7 中空軸構造の背景	15
1.8 本研究の目的	17
第 2 章 軸方向制御型磁気軸受の原理提案と磁気解析	18
2.1 軸方向制御原理	18
2.2 磁気解析 - 解析モデル -	23
2.3 浮上システム	28
2.4 PID コントローラ	29
2.5 変位センサ	30
2.6 変位センサ - 浮上コイルの影響 -	33
第 3 章 磁気軸受の作製と評価実験	35
3.1 磁気軸受の作製と軸方向吸引力	35
3.2 インパルス応答試験	37
3.3 ステップ応答試験	40
3.4 浮上回転実験	40
3.5 浮上回転結果	43
第 4 章 半径方向の受動支持方式	45
4.1 半径方向受動支持	45
4.2 ステータ内永久磁石位置検討	48
第 5 章 結言	54
5.1 まとめ	54
5.2 今後の課題	55
参考文献	56
謝辞	58

論文要旨

現在、多くの分野で電気技術・機械技術が重要な役割を果たしており、それらを支える必要不可欠な機械要素の一つが軸受である。しかし、機械接触を伴う軸受では損失が生じ性能に一部制限がなされる可能性がある。また、振動・騒音や潤滑油による汚染や磨耗に対するメンテナンスが問題となる。

これらの問題を解決する軸受として非接触で支持を行う磁気軸受が開発され適用が進められている。非接触で回転軸の支持が可能であるため、摩耗によるさまざまな問題を解決することができ、メンテナンスフリー、無潤滑、無発塵等の非常に優れた特長を有する。これらの特長を生かし潤滑油による汚染や不純物の混入を嫌う医療・化学・半導体製造等の分野でのポンプとしての応用が期待されている。しかし、人工心臓に対して適用される磁気軸受は、いくつもの軸を能動制御するため装置全体が大型化してしまう問題があると同時に、それらの制御システムが複雑となってしまう。

本研究の研究目的は、軸方向の1軸のみを能動制御し、装置の小型化と制御の簡単化を実現する、一つの解決策を提案するものである。また、軸流型を採用したことで遠心型と比べ軸長が延長し危険速度が低下したが、中空軸構造も採用することで半径方向の大型化を抑えることが可能であり、軸長の延長による危険速度の低下問題を解決することが期待される。

そこで、本論文では1軸のみを浮上制御する中空軸構造を有する磁気軸受を実現するため、以下の研究を行っている。

まず、第1章で、従来の機械接触を伴う軸受技術、非接触支持を行う磁気軸受の構造について説明し、更に磁気軸受の適用の一つである人工心臓とその問題点について解説している。そしてそれらの問題を解決する新しい構造の磁気軸受として1軸のみを浮上制御する中空軸構造の軸受を示唆している。また、この中空軸構造についての特長を示している。

第2章では、提案する磁気軸受について詳細を説明している。提案する磁気軸受は溝を有するディスクとシャフトから構成されるロータと永久磁石の配置された内環と外環からなるシリンダー状のステータで構成することで、効率的な磁路を形成することができると共に、装置の組み立て、分解を簡略化することを可能としている。また有限要素法解析による磁気解析によってその有用性を評価している。

第3章では、第2章の評価結果から磁気軸受を作製し、その評価実験について述べてい

る。擬似的な外乱に対する制御性の評価を行っている。また浮上制御時にモータによる回転駆動を行い、回転駆動時の軸方向及び半径方向の制御性の評価を行っている。

第4章では、第2章、第3章において検討が不十分であった半径方向の受動支持について有限要素法解析による磁気解析によって改善案を提案している。磁気カップリングによる受動支持について着磁方向と磁石個数を変更して評価している。また、ステータ内環に収められているリング状永久磁石の磁石位置も検討している。

第5章では、これらを要して提案する磁気軸受の特長を述べている。また、本論文で見られる課題に対しての解決指針を述べている。

第1章 序論

本章では従来の機械接触を伴う軸受技術として転がり軸受とすべり軸受についてまず簡単にまとめている。次に非接触支持を行う磁気軸受の構造について説明し、磁気軸受の応用分野と研究開発が急がれる人工心臓について述べている。またその問題点とそれらの問題を解決する新しい構造の磁気軸受として1軸のみを浮上制御する中空軸構造の軸受を示唆している。提案する磁気軸受は中空軸構造を要しており、その特長を示している。

1.1 従来技術

交通・運輸，産業等をはじめとする多くの分野で電気技術，機械技術が重要な役割を果たしてきた。幾多の斬新な発明，発見，開発が行われ，また，改良がくわえられてきた。それらのさまざまな機器に利用され，今日，必要不可欠な機械要素の一つとなっているのが軸受である。軸受（bearing）とは，荷重を受けながら回転する軸を支持する機械要素である。接触の具合及び荷重の作用状態によって軸受は転がり軸受とすべり軸受に分類することが出来る。軸受の選定は一般的には先ず簡便で保守の手がかからない転がり軸受の使用を検討し，それが使用できない場合にすべり軸受の使用を考えることが多い[1]。

Fig. 1.1 に転がり軸受を示す。転がり軸受とは軸と軸受の間に転動体として玉またはころを入れて，転がり接触をする軸受である。受けることが出来る荷重の種類によってラジアル軸受とスラスト軸受に大別される。ラジアル軸受は荷重が軸心に直角にかかる軸に対して使用し，スラスト軸受は荷重が軸心に平行してかかる軸に対して使用する。ラジアル軸受は主としてラジアル荷重を受けるが，殆どが同時にスラスト荷重も受けることができる。しかし，スラスト軸受は一般にスラスト荷重しか受けることができない。転がり軸受は高速回転に強い半面，過大荷重や衝撃荷重には弱く，設計の配慮が必要である[1]。



Fig. 1.1 Ball bearing.

Fig. 1.2 にすべり軸受を示す。すべり軸受とは軸と軸受がすべり接触をする軸受の事で平軸受とも呼ばれる。すべり軸受は潤滑機構により流体、境界、涸渇、無潤滑に分類できる。流体潤滑は軸を流体潤滑油膜で支持しており、摩耗の発生がなく、寿命は半永久的である。動荷重下では疲労現象により寿命が決まる。境界潤滑は流体潤滑の様に潤沢な油膜ができない状態で分子の膜で二面間を潤滑するものである。表面に吸着した僅かな分子膜や添加剤によって表面の改質層が摩擦力を減少させる。涸渇潤滑（セミドライ）は油切れにより固体接触が発生し、すべり面の凹部に油が残るもので、摩擦が寿命を決定する。無潤滑（ドライ）は固体潤滑以外の潤滑剤が全くない乾燥摩擦、すなわちドライベアリングの状態で、摩擦が寿命を支配する[2]。



Fig. 1.2 Sliding bearing.

1.2 非接触技術

1.1 節の問題を解決する方法として磁気軸受 (magnetic bearing) と呼ばれる非接触軸受機構がある。磁気軸受の定義としては、「磁気軸受は物体を永久磁石や電磁石の磁氣的な力により非接触で支持する軸受機構」とする。物体を非接触で支持することができれば以下のような利点があげられる。

(1)非接触化 : 磁氣的な力によって浮上させることで、摩擦・摩耗の問題が全く、もしくは極めて小さくなる。それに伴い、支持対象物や支持装置の寿命が半永久的でかつメンテナンスフリーとなり、接触による振動・騒音が極めて小さく、回転体であれば超高速で回転させることが可能となる。またクーロン摩擦がなくなり滑らかな動きが得られるとともにエネルギー損失が少なくなる等の特長が得られる。

(2)特殊環境での使用 : 潤滑油を使用しないため、高温や低温、水蒸気中、特殊ガス中や無重力空間、真空中や生体内、清潔さが求められるクリーンルーム内等の特殊な環境下で使用する事が可能である。

(3)制御性 : 能動制御を取り入れたものでは、振動減衰能力、位置制御能力、可変剛性機能 (支持の強さを状況に応じて変える機能)、コンピュータ制御の容易さ、制御系のフレキシブル化等の特長が得られる。

(4)特殊機能の付与 : 隔壁として磁場の通過が可能な物質を用いることで、壁を隔てて対象に駆動力・支持力を与えることが可能となり、記憶・学習・判断能力等のインテリジェント化、運転状態の監視・記録・診断機能等が得られる。

(5)力の分布 : 例えば普通の列車では車輪とレールが接触する部分に集中的に力が加わるが、磁気浮上列車では力は磁石のある面に広く分布するため、列車走行の際の軌道に対する荷重条件を和らげることが可能である。磁気軸受では軸受位置を強制的に固定せず、支持力を分布させることができるので、回転子に不均衡があっても回転に対する軸振動を和らげることができる。更に薄鋼板のように、非常に柔軟な対象を浮上させる場合にも力が分布的に作用するために、その形状を変化させることなく支持することができる。

(1)~(5)に付随して生じる副次的な効果として例えば油潤滑が不要となるため、油圧ポンプ、油圧系統のポンプ類、油を浄化する装置が不要となり、汚染の問題がなくなる、システムとして床面積が少なくなる場合がある、設置場所に対する制約が少なくなる場合がある等、さまざまな利点生まれる。昨今の電気、機械技術の進歩の趨勢もあり、今後ますます応用が広まる事が期待される。

その一方で磁気軸受には、以下のような短所も見られる。

(1)磁界の漏れ : 磁気浮上装置から磁界が漏れることによって、外部機器や周りの精密機器に影響を及ぼす恐れがある。

(2)価格 : 従来の機械接触を伴う軸受と比較して、磁気軸受や浮上制御装置等によって価格が高くなる場合がある。

(3)安全面 : 制御系において停電や制御装置の故障に対する対策を考えておく必要がある。また、本当に安全・安心なのかという心理的な不安感がある。

しかし、これらの短所に対して価格について言えば、磁気浮上システム単体では従来型に比べて効果であるものの、潤滑系統が不要になる、電子制御によって容易に制御できる等、システム全体の価格やその保守費用を考えると十分引け劣らないと考えられる。また技術の進歩によって装置に用いる電子部品等がより安価になることも考えられる。これらの利点から、物体を非接触で支持・搬送できる磁気軸受・磁気浮上技術は工業の分野においても応用が非常に期待されていると考えられる[3]。

磁気浮上には多くの方式が提唱され、また実用化されている。磁力を発生する主なものとして、永久磁石、常電導電磁石、超電導磁石の3種がある。一方、電流或いは磁力線を通して通しやすい物質として、超伝導体、強磁性体、金属導体の3種がある。以上の6種の物体の組合せによって各種の磁気浮上方式について以下のようにまとめる。

- (1)永久磁石と超電導体との間に働く反発力を利用する方式
- (2)永久磁石と強磁性体との間に働く吸引力を利用する方式
- (3)常電導電磁石と強磁性体との間に働く吸引力を利用する方式
- (4)超電導磁石と強磁性体との間に働く吸引力を利用する方法
- (5)常電導電磁石と金属導体との間に働く反発力を利用する方式
- (6)超電導磁石と金属導体との間に働く反発力及び吸引力を利用する方式
- (7)超電導磁石と常電導電磁石との間に働く吸引力を利用する方式
- (8)常電導電磁石と永久磁石との間に働く吸引力を利用する方式
- (9)常電導電磁石同士との間に働く吸引力を利用する方式
- (10)永久磁石同士との間に働く反発力及び吸引力を利用する方式

Fig. 1.3 に物体の自由度を非接触で支持するための基本的な形式を示す。Fig. 1.3(a)は同磁極間の反発力を利用したもの（方式 10）である。Fig. 1.3(b)は常電導電磁石と強磁性体間の吸引力を利用したもの（形式 3）、Fig.1.3 (c)は永久磁石間の吸引力を利用したものである（形式 10）。Fig. 1.3(a), (c)の形式においては、つり合いの位置への復元力が得られるため、無制御でも安定に支持する事ができる。Fig.1.3 (b)の形状においては磁石と対象物の吸引力

はその距離が小さくなると大きくなるため、安定化のためにフィードバック制御が必要である。この様に能動的に非接触支持制御する形式のものは支持剛性や減衰特性を変化させることができるため、受動的に非接触支持する形式に比べて剛性や減衰性を高く設計することが可能である。磁気軸受はこれらの形式を組み合わせることで構成できる[3, 4]。

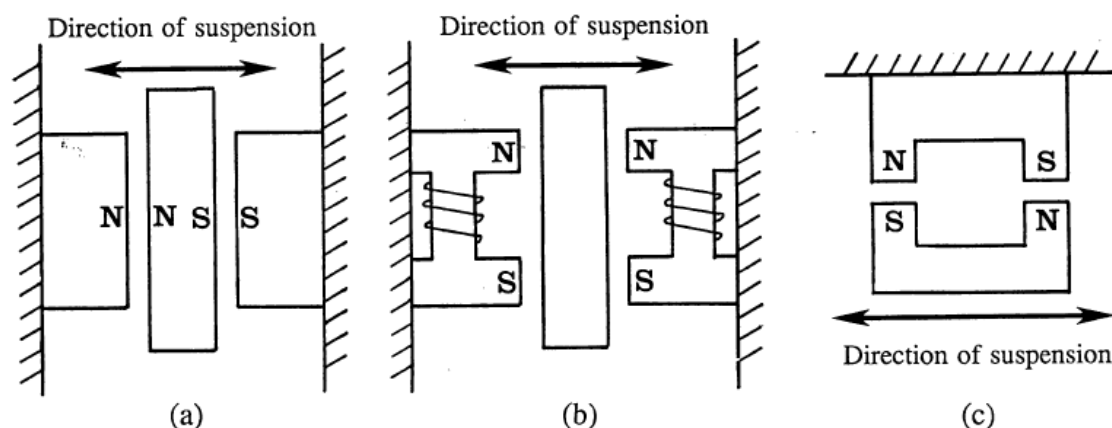


Fig. 1.3 Basic elements of magnetic levitation mechanism.

1.3 磁力を用いない非接触浮上

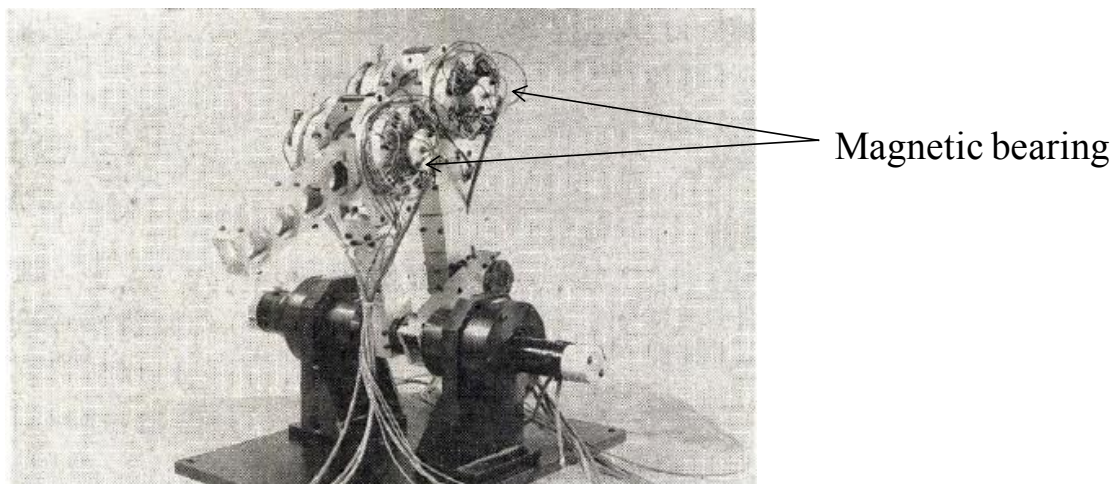
前節では磁力を用いた非接触技術について述べたが、磁力を用いない非接触技術には空気圧、静電気力を用いるものがある。空気圧を用いるものは、例えば株式会社工藤鉄工所製のエアテーブルがある。これは、テーブル天板にある無数の穴よりエアを噴出することで、テーブル面上の物体を浮上させるものである。静電気力を用いるものでは、発生力が他に比べて格段と小さいことから用途が少ないが、シリコンウエハやガラス等の非接触浮上が行われている。超音波を浮上技術として用いているものもある。浮上対象は振動板から放射される音波の放射圧によって浮上するものである。また、振動板の振動を進行波とすることで、物体（浮上体）の搬送が可能である[5 - 8]。

1.4 磁気軸受の応用

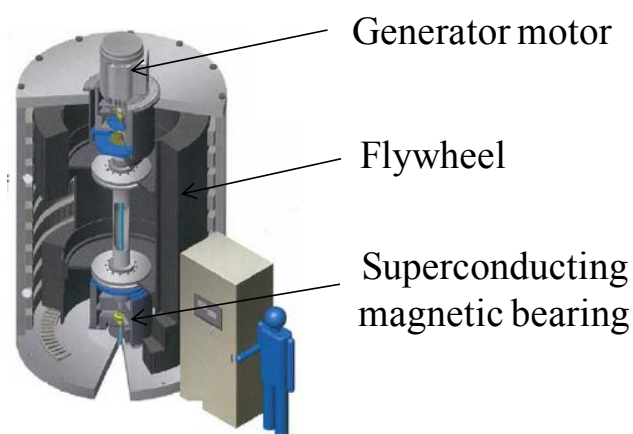
半導体製造産業では、大容量の情報の高速処理を目指してメモリやCPU等のICのパターンの微細化技術が求められている。この微細化技術にともない、製品の製造のための装置の開発はもとより、製造時の環境においてもクリーンルームや真空機器の利用等に見ら

れる。このようなクリーンルームや真空中では埃の発生や安全性、信頼性等の面から作業をロボット等の自動機械に行わせることが望まれるが、現在その殆どのロボットにはボールベアリングやローラベアリング等機械的な接触による軸受が用いられている。そのため潤滑油の必要性や塵埃の発生をともしう摺動面が存在する等の問題がある。現在、クリーン環境でロボットを利用する時の対策としてはパッキンや磁性流体によるシールを利用して発塵部を密閉化する、特殊グリスを利用して油飛沫の飛散を防止する、ロボットの内部を負圧にすることにより、クリーンルーム内への塵埃の拡散を防止する等が行われている。しかし、発塵の根本的な解決策ではなく、高精度な加工の必要性、保守や寿命の問題等がある。この様な問題を解決するために Fig. 1.4(a)に示すようなロボット関節の軸受に磁気軸受を利用することが提案、研究されている[4]。

その他の応用分野として、例えば、能動型磁気軸受を用いた人工衛星の姿勢制御のための磁気軸受型フライホイールやオングストロームあるいはナノメートル単位の精密操作が求められる顕微鏡用位置決め機構（直線運動系）、Fig. 1.4(b)の超電導体のマイスナー効果による磁気浮上を利用した超伝導型磁気軸受を用いた電力貯蔵用フライホイール等が考えられ、研究されている。本研究では医療分野、とりわけ人工心臓への応用について考える。



(a) Robot arm



(b) Superconducting flywheel

Fig. 1.4 Application example of magnetic bearing.

近年の心臓外科は飛躍的な技術の進歩がみられ、これまで難治とされてきた重症心疾患の多くのものが救命・延命可能となりつつあるが、非常に複雑な心奇形、広範囲に侵された冠動脈疾患、重症心筋梗塞、重症心肺障害などはまだ救命し得るとは言えない。また、心臓移植を希望して日本臓器移植ネットワークに登録している患者数は2014年9月で341名に上るが、依然としてドナー不足が深刻な問題となっている。こうした問題から、血液循環を代行するもの、心臓移植の法的・社会的障害に対して移植待機患者の移植までの補助として、人工心臓が注目されている。人工心臓にはどこに置かれるかによって、外部に設置する体外循環型と、体内に設置する体内埋込型とに分類することができる。体外循環型の人工心臓は、救急救命や手術中の血液循環に用いる数時間の短期使用から、手術後か

ら数日程度の中期使用、心機能回復までのブリッジ使用・生涯使用を目的とした長期使用といった使用目的の多様化がみられる。体内埋込型の人工心臓は、心疾患患者の外出や自宅療養が可能で、社会復帰を目標としたシステムである。外部からの駆動用電源供給や制御用信号の送受信等からの感染リスクを低減できる等、心疾患患者の生活の質向上が見込める[9]。人工心臓は、心疾患患者の心臓をそっくり切除して生体心臓と置き換える全置換型人工心臓（Total Artificial Heart : TAH）と、心臓を切除せず、心機能を補助する補助人工心臓（Ventricular Assist System : VAS）に分類される。その中で補助人工心臓は、主に左心室の補助に用いられるが、二つの血液ポンプ部分を有した両心室補助型も研究されている。補助人工心臓には、血液ポンプ部分の形式から拍動流型と定常流型に大別することができる。

拍動流型はダイヤフラムやサックと呼ばれる駆動部分を持ち、生体心臓と同様にその収縮によって血液を流入・流出させる人工心臓である。Fig. 1.5 に拍動流型のいくつかの拍動方式を示す。Fig. 1.5 より、どの拍動方式においても自然の心臓と同様に流入口と流出口に人工弁が取り付けられていることがわかる。拍動流型は、人工弁やダイヤフラムなどの駆動部分における耐久性の問題や、容積型ポンプであることから、ポンプサイズが大きくなりやすいことが問題としてあげられる[9]。

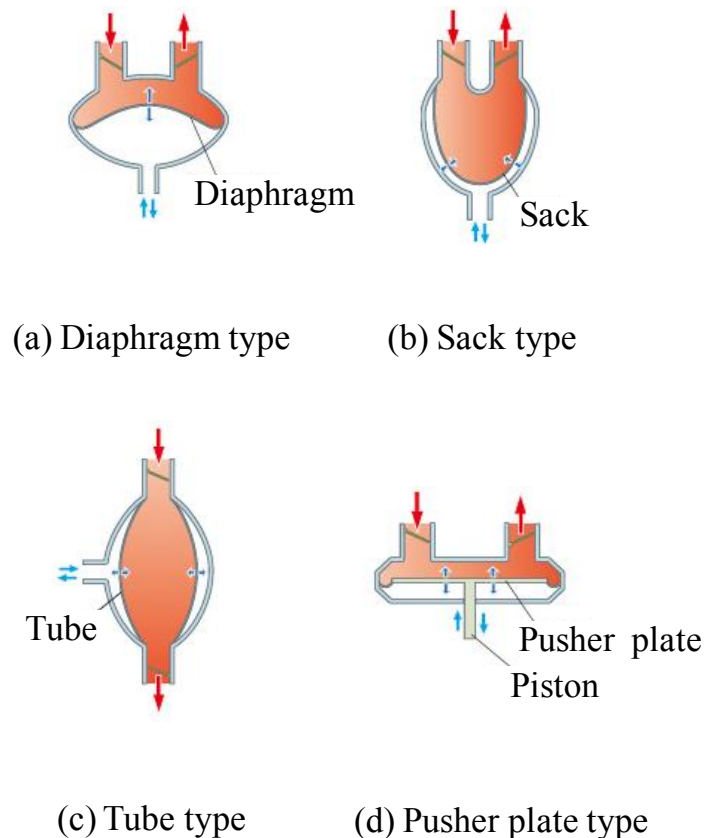


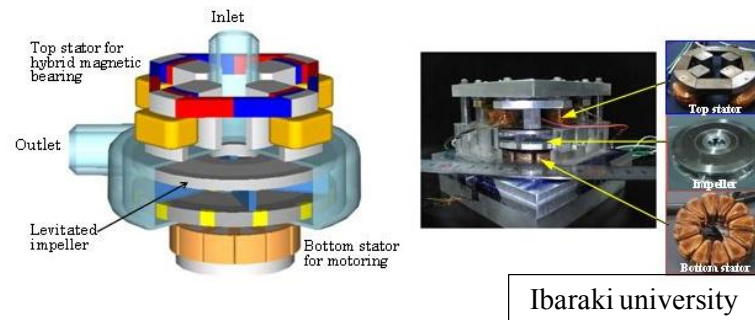
Fig. 1.5 Various pulsatile-flow blood pump.

拍動流に対して、定常流（無拍動流）を用いた血液ポンプでは、拍動流で必要とされる人工弁が不要である、耐久性向上が可能である、体格の小さな患者への応用も容易なシステムになり得る等の利点から、世界の多くの研究機関で研究が進められている[9]。この定常流を用いた連続流型補助人工心臓は、その形式から遠心型と軸流型に分類される。

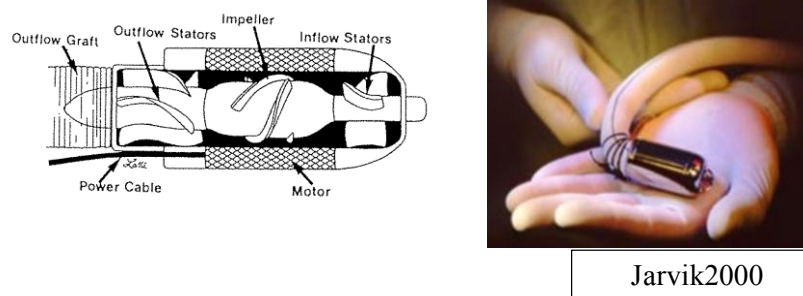
Fig. 1.6(a)の遠心型ポンプはポンプ内部のインペラ（羽根車）が回転することにより生じる遠心力で血液を吸引、駆出する機構を持つポンプである。遠心型のうち、機械接触のある軸受を採用した血液ポンプとしては、サンメディカル技術研究所の EVAHEART が、非接触軸受を採用した血液ポンプとしては、テルモ株式会社の DuraHeart が代表的である。DuraHeart のインペラは羽根を 2 枚のディスクで挟むダブルクローズド構造で、軸方向 1 自由度と傾き方向 2 自由度の 3 自由度を能動制御により支持される。

Fig. 1.6(b)の軸流型ポンプは回転するインペラ軸の前後に発生する揚力により血液を駆出する機構を持つポンプである。軸流型はインペラ的高速回転を要するものの、小型化には遠心型よりも有利である。軸流型のうち、接触軸受を採用した血液ポンプとしては、Jarvik Heart 社の Jarvik 2000 が、非接触軸受を採用した血液ポンプとしては、Berlin Heart 社の

INCOR が代表的である。INCOR はインペラの軸方向運動を磁気軸受を用いて能動制御し、並進と傾きの 4 自由度を永久磁石により受動支持する 1 自由度制御磁気軸受を採用している。



(a) Centrifugal pump



(b) Axial flow pump

Fig. 1.6 Continuous flow type blood pump.

1.5 軸流型磁気軸受

Fig. 1.7 に軸流型ポンプの一例を示す。Fig.1.7 (a)は一部を切り欠いた斜視図を示しており、 x , y , z 軸方向全てに変位センサが設けられていることがわかる。Fig. 1.7(b)は軸流ポンプの断面を示しており、半径方向に磁気軸受によって非接触支持を行っていることがわかる。また、ロータ径は 20mm であるが、ステータによって装置全体が半径方向に大型化していることがわかる。Fig. 1.7(c)は使用を想定した外観例である。ロータにインペラを設けるため回転駆動用のロータ磁石とステータ間に大きな半径方向エアギャップがあることがわかる。

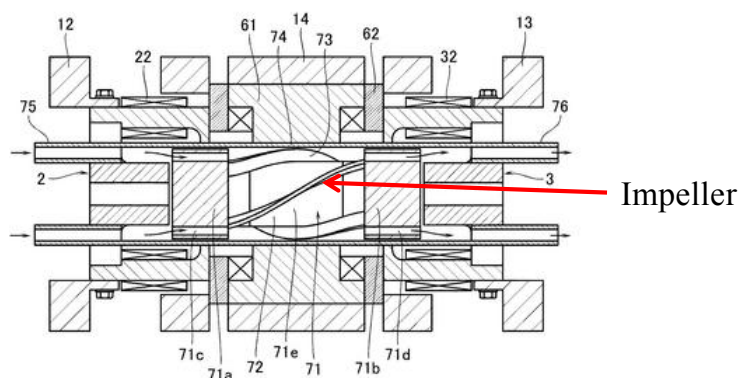
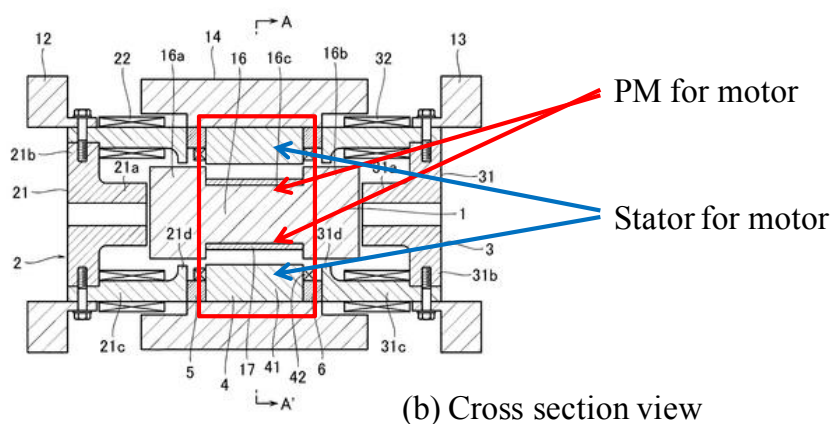
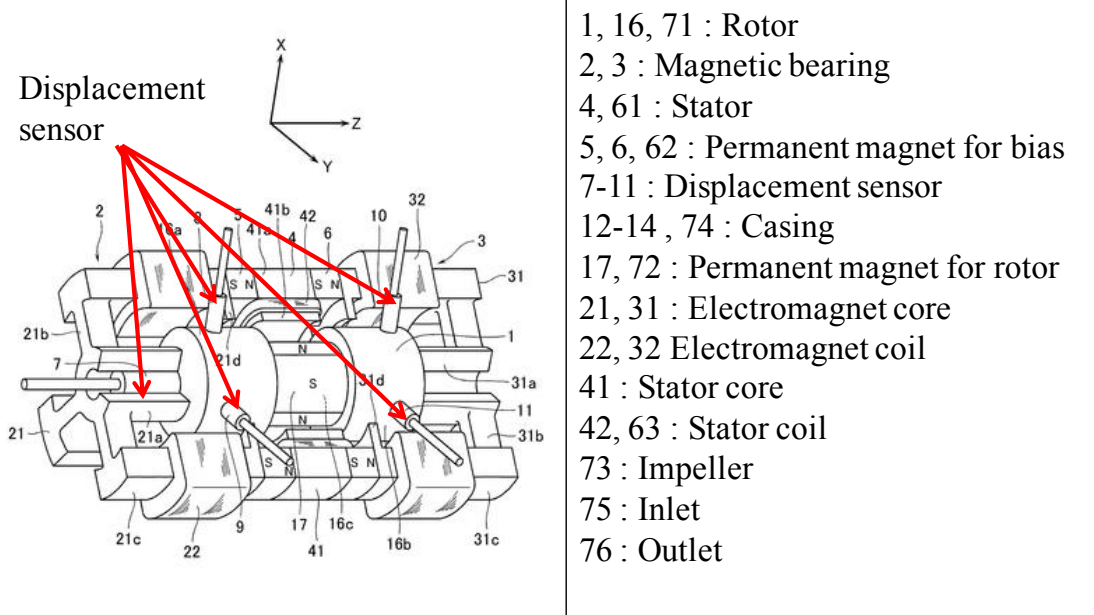
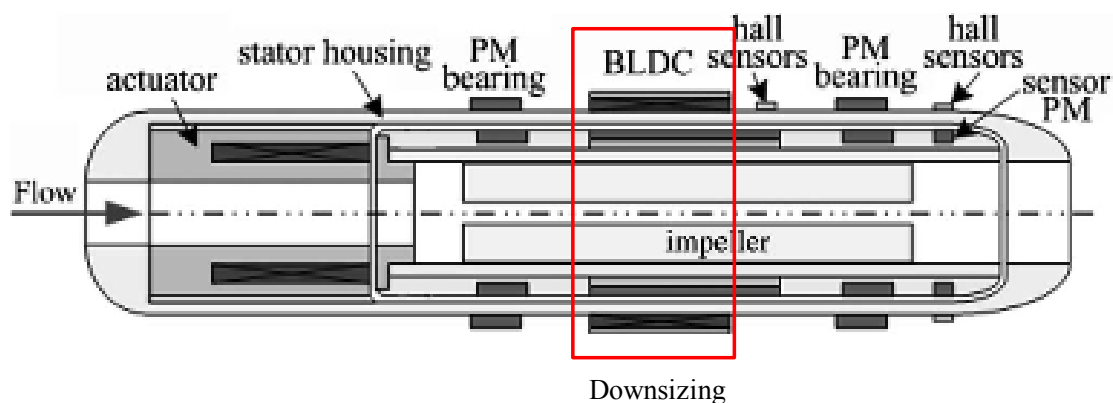
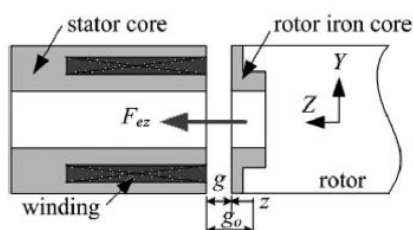


Fig.1.7 Examples of axial flow pump.

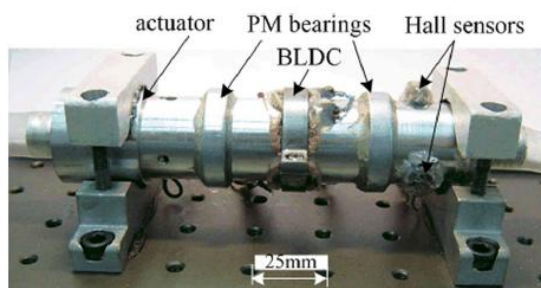
ロータとケーシングの隙間を小さくして回転駆動力の高効率化を図るため、Sheng-Ming Yang らは中空軸構造を採用している[10]。Fig. 1.8(a)に中空軸構造を持つ軸流型ポンプの断面図を示す。Fig. 1.8(b)に z 軸方向制御のための電磁石アクチュエータを、Fig.1.8 (c)には作製された軸流型血液ポンプの外観を示す。Fig.1.8 (a)から軸方向の 1 軸のみを能動制御していることがわかる。Fig. 1.8(b)からアクチュエータ（ステータ）は内環と外環をもつシリンダー状の構造で、内環と外環の間に浮上コイルが収められていることがわかる。ステータとロータは流路として中空軸構造となっており、ロータの中空部分にはインペラが収められている。半径方向は永久磁石による磁気カップリング（PM ベアリング）によって受動的に支持されている。回転駆動はロータ中央部分の永久磁石とケーシングに設けられたステータによって行うが、Fig. 1.7 と比較してインペラをロータ外周部に設ける必要がないため、半径方向エアギャップが小さいことがわかる。



(a) Cross-sectional view of prototype axial blood pump



(b) Electromagnetic actuator



(c) Prototype axial blood pump

Fig. 1.8 Single-axis controlled axial blood pump with a hollow shaft.

1.6 磁気軸受の課題

磁気軸受は前述の通り、回転体を非接触で支持するため、軸受部の保守が不要、回転損

失が少ないので回転機構の効率が良い等の特徴・長所がみられるが、各軸毎にセンサ・制御回路・電磁石等が必要で従来の軸受を用いた場合に比べて高コストである、固有振動数で決まる危険速度がある等の問題点がある。前者の問題点についてはコストだけでなく、装置全体が大型化し、また軸長の延長により後者の問題点である危険速度の低下、すなわち最高速回転数の低下等、高速化に対して不利な一面をあわせ持っている。

また、人工心臓において耐久性の向上、溶血の低減、血栓形成の抑制のため、インペラを非接触で支持する磁気軸受や動圧軸受の採用が有効である。特に磁気軸受は、動圧軸受に比べ、流体隙間を大きくできるため、溶血を少なく抑えることができるが、各自由度の能動制御や受動支持を行うために、ポンプサイズ的大型化や消費電力の増加、複雑な制御システムの採用による信頼性の低下とランニングコストの増加が問題となる。これまで、磁気軸受を採用した血液ポンプは、インペラの5自由度のうち、出来るだけ多くの自由度を磁気カップリング等により受動的に拘束し、能動制御する自由度数を減らす試みがなされてきた。しかし、これらの血液ポンプでは、小児用も見据えた更なる小型化、高信頼、低消費電力化が求められている[11, 12]。

1.7 中空軸構造の背景

1.4 節の中空軸構造について、ガスタービンのブレードの冷却装置を開発するためにロータ内部を中空にし、その中に水を封入した回転軸の実験の過程で危険速度以上のある軸回転数域で激しい自励振動が発生した例が報告されている。また、ジェットエンジンのコンプレッサ内に漏れて溜まった潤滑油によって同様な激しい非同期ふれ回り運動が生じたとの報告もある。この様に液体を部分的に内蔵した中空回転軸系・円筒容器を回転させると、特定の回転数領域においてしばしば自励振動を引き起こすことがある[13, 14]。これらの自励振動の特徴や発生メカニズムは以下のように説明することができる。

まず、発生する自励振動は軸の危険速度にほぼ等しい角速度 Ω で軸の回転と同じ向きにふれ回る、所謂前進ふれ回りである。この時、遠心力によってロータ内の空洞壁に張り付いた液体の自由表面には軸に同期して伝播する波動が発生している。自励振動発生時の軸回転数 ω は一般に危険速度 Ω よりも高い。したがって、この波動は Fig. 1.9(a)に示すようにロータに相対的に軸回転とは逆方向に $\Omega - \omega$ の角速度で伝播する、所謂後進波となる。その位相は液体の粘性のため軸振動に対して常に遅れている。一方、ロータに作用する液体力の方向は波動の方向にほぼ等しいから、液体力の方向も Fig. 1.9(b)に示すようにロータ振動に対しある角度 Φ だけ遅れることになる。ロータに固定した回転座標系からみたこの位

相の遅れは静止座標系から見ると進みになる。この進みによる液体力のふれ回りの成分がロータに作用する減衰力よりも大きい場合に自励振動が発生する[13]。すなわち、内蔵された液体は遠心力によって中空回転軸系・円筒容器の側面に押し付けられ自由度表面が形成され、不安定振動が発生している回転数領域では液体の自由表面に進行波が形成さる[14]。この現象についてこれまでに実験及び解析がなされ多くのことが明らかにされている。

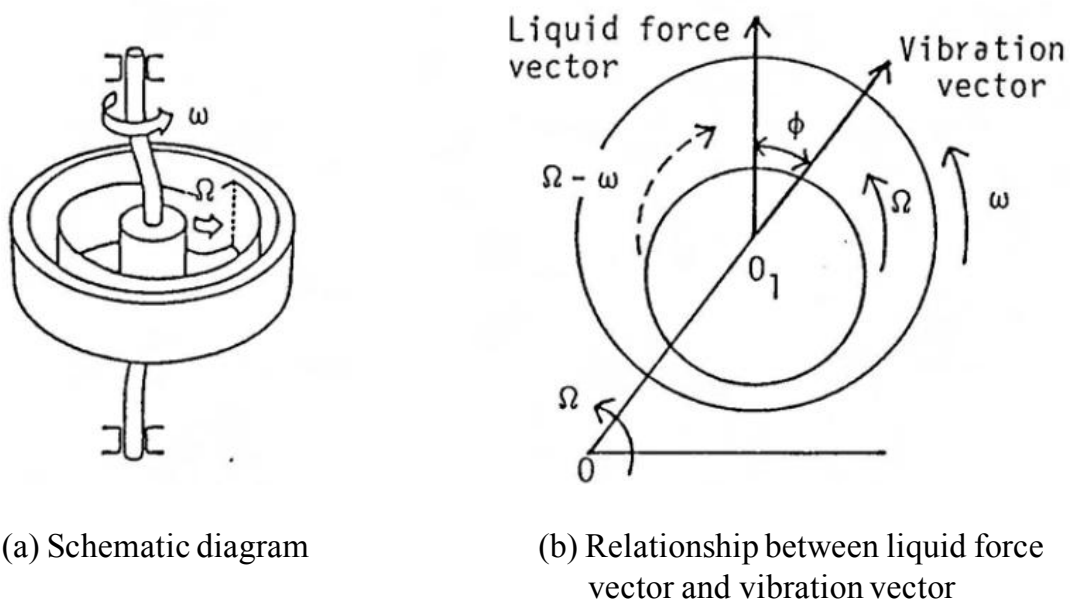


Fig.1.9 Rotor incorporating partially liquid.

同様な現象は比重の異なる2種類の液体で満たした場合も起こり得る。上記のようにこの種の自励振動は液体の自由表面または界面上を軸回転と逆方向に伝播する波動によって引き起こされる。この自励振動を安定化させるための電磁ダンパやアクティブ振動制御についても研究がなされている。しかし、これらの対象としている系は液体を封入した状態であり、液体の流入・流出はない。

本研究の背景も含め回転機械には遠心分離器の様に作動中に回転体内部の流体を遠心力によって放出するものがある。そのような系では回転体内へ流体が連続的に流入・流出しており、一定の液体が回転体内部に内蔵されている系の特性とは異なる。回転している中空回転軸系・円筒容器内に一定流量の水を供給し、同時に容器内側壁に設けたスリットから遠心力により水を放出させた時の系の安定性に関する実験では、(1)水量が増加すると系が安定化する、(2)安定化の傾向は、回転体内部の水厚 h が大きくなるとそれがより顕著と

なることが知られている[14]。

これらのことから、ロータの軸中央に流路を持つ中空構造を採用することで、ロータとケーシングの隙間を小さくでき、回転駆動力の高効率化を図れるとともに、軸長の延長による危険速度の低下と高速化の困難化を解決することができると考えられる。すなわち、流体と合わせて磁気軸受による磁気浮上系の安定化を図る。

1.8 本研究の目的

これまで電気技術、機械技術が必要な分野において 1.1 節に述べた通り転がり軸受やすべり軸受が用いられてきた。電気技術、機械技術の更なる進歩が要求されており、機械的接触をとまなわない磁気軸受の研究・開発が進められている。磁気軸受の進歩によって従来の軸受では実現できなかった分野での使用が期待される。

そこで 1.4 節で述べたように、ロボットの関節や人工心臓への適用を目指した磁気軸受機構が提案されている。そのためには軸受部の保守が不要、回転損失が少ないこと等も重要であるが、センサ・制御回路・電磁石等によって高コスト化、危険速度の低下、装置全体の大型化が問題となっている。

そこで本研究では、低コスト化、装置全体の小型化を実現するための磁気軸受について以下の研究を行っている。まず、軸方向 1 自由度のみを浮上制御する小型の軸流型磁気軸受の構造を提案する。提案する磁気軸受は円筒形とすることで制御系を容易にするとともに、部品点数の少なさから装置の組立・分解の簡略化と低コスト化を実現する。次に実際に作製して各種の実験を行うことで、その性能評価を行う。そして、ロータの軸中央に流路を持つ中空構造を採用することで、ロータとケーシングの隙間を小さくでき、回転駆動力の高効率化を図る。

第2章 軸方向制御型磁気軸受の原理提案と磁気解析

本章では提案する磁気軸受について詳細を説明している。提案する磁気軸受は溝を有するディスクとシャフトから構成されるロータと永久磁石の配置された内環と外環からなるシリンダー状のステータで構成することで、効率的な磁路を形成している。ロータの軸方向両端に配置されたステータによってロータを軸方向にプッシュプル的に浮上制御する原理について述べている。また有限要素法解析による磁気解析に軸方向、半径方向、傾き方向に変位した際の復元力について評価している。加えて、本磁気浮上システムに用いる PD 制御と変位センサについて解説している。変位センサについては中空軸構造を有するインダクタンス型の変位センサであり、その有用性の評価結果について述べている。

2.1 軸方向制御原理

磁気軸受はその利点から、人工心臓やターボ分子ポンプ、スピンドルなどにも適用、実用化されている。しかし、磁気軸受はギャップを検出するためのセンサや電磁石、制御回路などを必要とするため、従来の機械接触式軸受を用いた場合に比べてコストがかかり、装置全体が大きくなってしまう。能動的な制御を行う自由度が多いほど装置全体の大型化、システムの複雑化は避けられない。例えば、4 軸制御型の磁気軸受では四つの渦電流センサを用いてロータの径方向位置を検出している[15]。本研究同様、軸方向 1 自由度のみを浮上制御する中空軸構成を有する磁気軸受においても、四つのホールセンサを用いている[10]。また、ギャップセンサを用いないセンサレス磁気軸受は、これらの問題を解決する可能性を持っているが、制御システムがセンサを用いる場合と比べてより複雑になってしまうことと実用化に至っていないという問題がある[16]。そのため、磁気軸受の信頼性向上の観点から、複雑な磁気浮上制御システムを単純化することは重要である。

Fig. 2.1 に浮上対象を磁気軸受による吸引力によって浮上させるシステムを示す。Fig. 2.1 に示す浮上系は、一つの浮上対象と一つの電磁石から成る 1 自由度の懸垂式吸引型磁気浮上系を考える。このシステムは浮上対象に働く吸引力と重力がつり合うことで浮上位置を

保持する。この時浮上対象に働く吸引力は、電流を定数とした時、浮上対象と電磁石間のエアギャップの 2 乗に反比例して小さくなる。その関係を Fig. 2.2 に示す。浮上対象の位置が電磁石から離れた時、吸引力が弱くなるので負のばね特性を持つ。この負のばね特性のため、システムは不安定であり、浮上させるためにはエアギャップに応じて電流を変化させ、正の剛性と減衰を与えるフィードバック制御が必要となる。多くの場合このフィードバック制御はエアギャップを検出するための位置検出センサ、エアギャップに応じて浮上に必要な電流または電圧を演算する演算制御回路、制御信号を増幅し電磁石を駆動するアンプで構成される。Fig. 2.3 にこの制御システムを示す。位置検出センサに用いられるセンサは渦電流型、容量型、光学式等がある。演算制御回路は OP アンプから成るアナログ演算回路と DSP や FPGA 等のデジタル演算回路がある。アンプは大別してリニアアンプと PWM アンプが用いられる[17]。

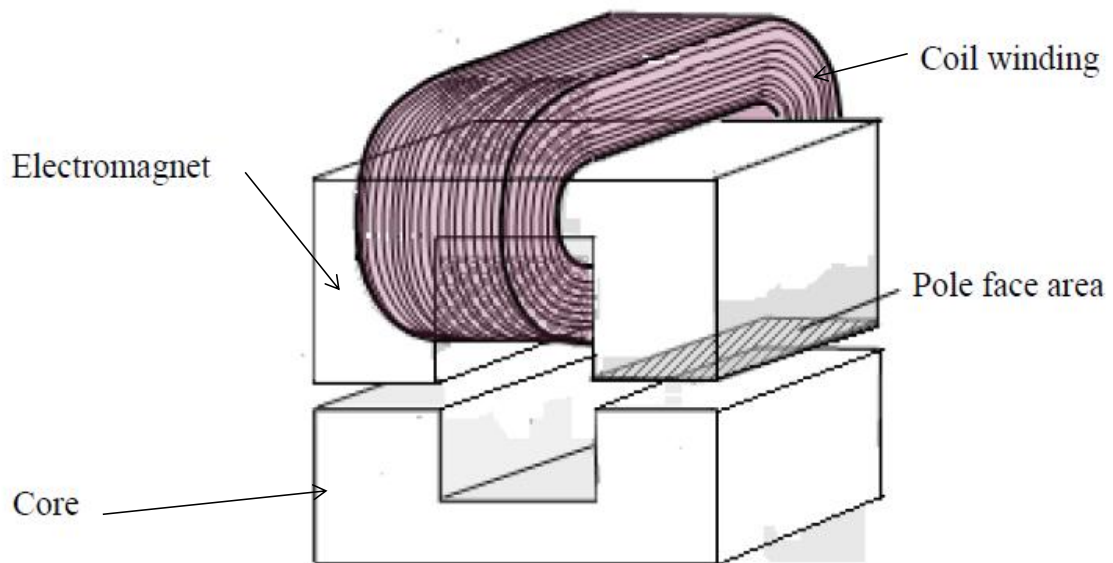


Fig. 2.1 Electromagnetic levitation system.

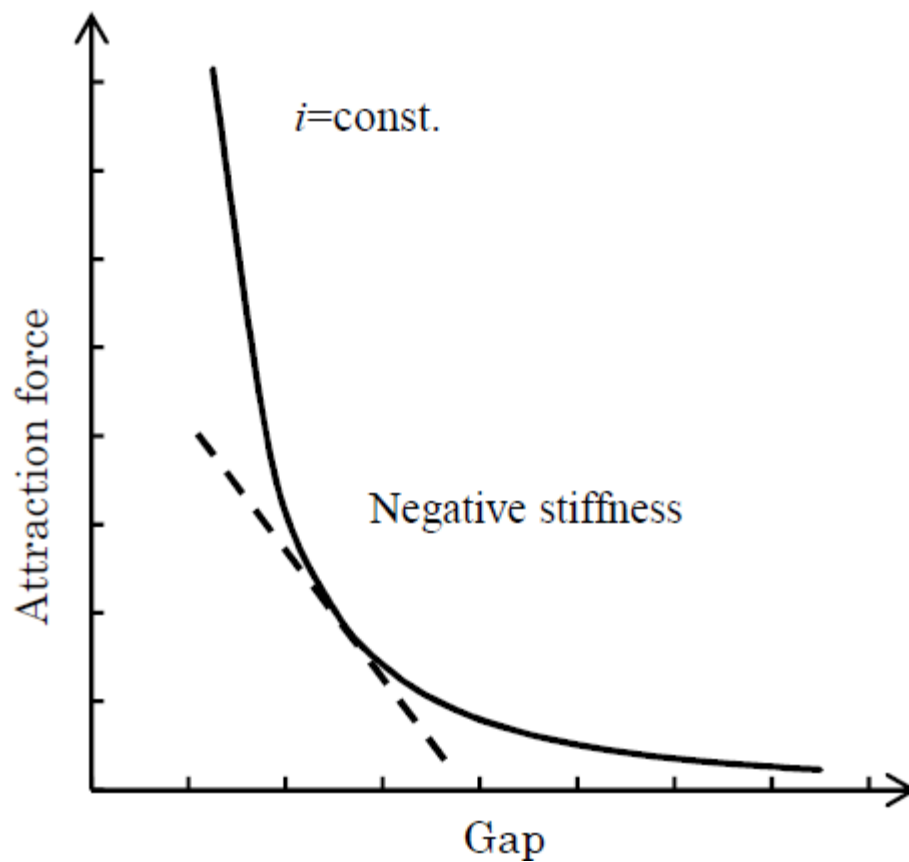


Fig. 2.2 Relationship between gap and attractive force.

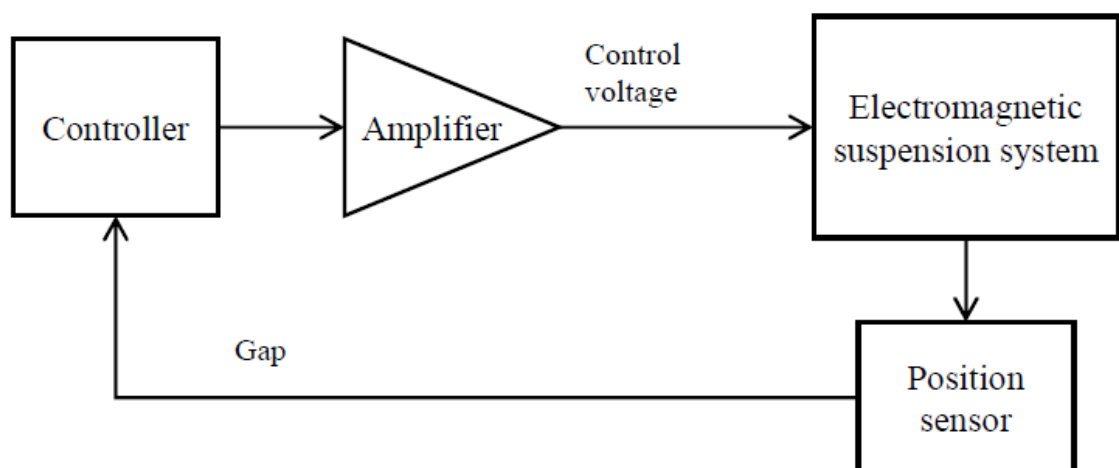


Fig. 2.3 Basic electromagnetic suspension system.

Fig. 2.1 の磁気系を基に磁気軸受モデルを提案する。Fig. 2.4 は提案する中空軸構造を持つ軸方向一軸を浮上制御する磁気軸受の簡略モデルである。ロータは溝が設けられたロー

タディスクとロータディスクを繋ぐロータシャフトから構成される。ステータは内環部と外環部のからなるシリンダー状の電磁石（浮上コイルを含む）とリング状の永久磁石から構成される。リング状の永久磁石は浮上コイルに流れる電流を小さくするために設けており、バイアス磁束を得ている。Fig. 2.1 の浮上系では浮上対象を吸引力と重力とのつり合いで浮上位置に保持していたが、浮上位置までの到達速度に問題がある。そこで提案する磁気軸受は到達速度の改善を図るため、ロータの軸方向両端に位置するステータによってプッシュアップ的に浮上制御を行う。

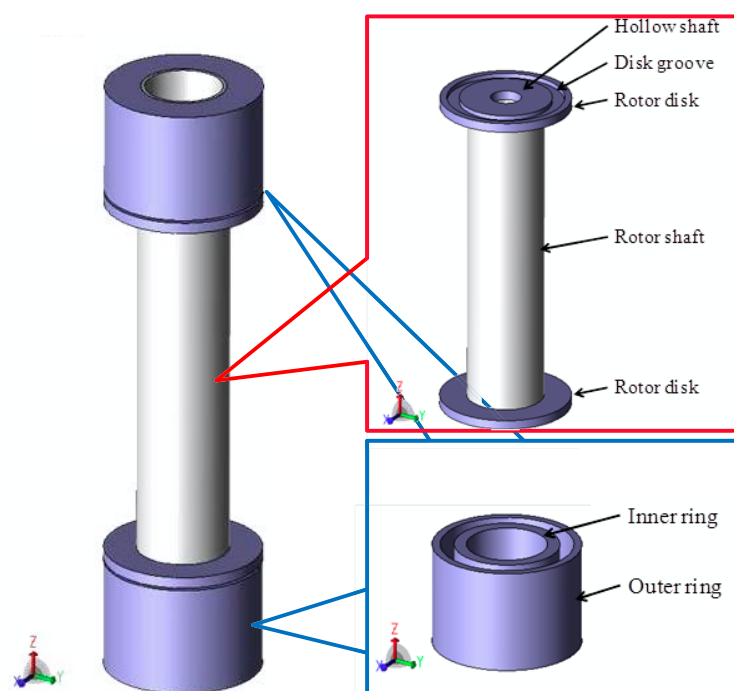


Fig. 2.4 Proposal magnetic bearing model.

ロータの浮上制御について述べる。Fig. 2.5, 2.6, 2.7 に下側のロータディスクに働く吸引力制御の方法を示す。Fig. 2.5 は目標浮上位置で浮上している場合である。リング状の永久磁石から発生するバイアス磁束を実線で示している。バイアス磁束はステータ内環部、ロータディスク、ステータ外環部を通して磁路が閉じる構造となっている。またこの際、ロータディスクに設けた溝によって効率的な磁路が形成できている。

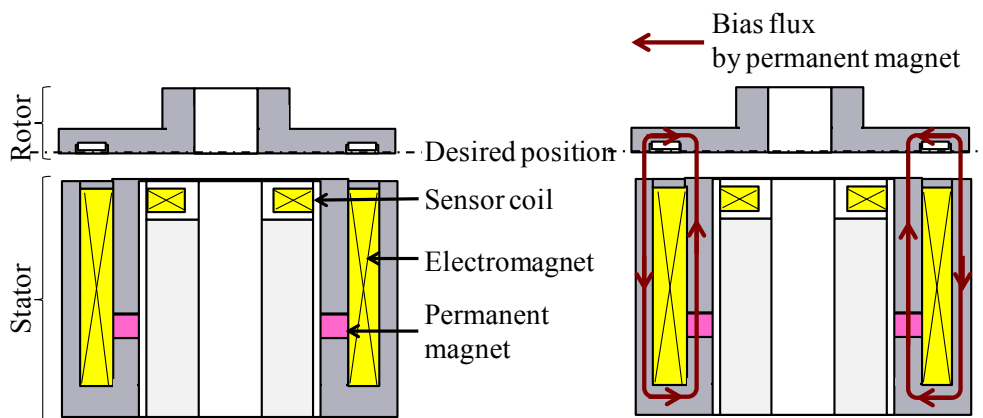


Fig. 2.5 Generated bias flux by permanent magnet in rotor and stator.

Fig. 2.6 は目標浮上位置よりもロータが軸方向上側に変位している場合の吸引力制御を示している。破線で示しているのは浮上コイルに電流を流した際の制御磁束である。Fig. 2.6 では実線で示されている永久磁石によるバイアス磁束と、破線で示されている電磁石による制御磁束の方向が一致しているため、エアギャップにおける磁束密度が増加し、吸引力が増加する。

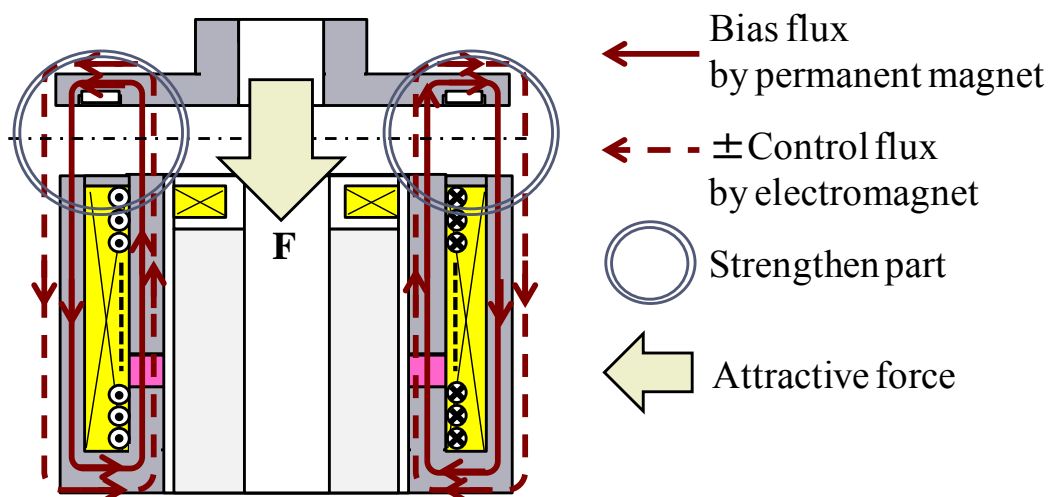


Fig. 2.6 Control of strong attractive force by control flux.

Fig. 2.7 は目標浮上位置よりもロータが軸方向下側に変位している場合の吸引力制御を示している。Fig. 2.7 では実線で示されている永久磁石によるバイアス磁束と、破線で示されている電磁石による制御磁束の方向が逆向きであるため、エアギャップにおける磁束密度が低減され、吸引力が減少する。

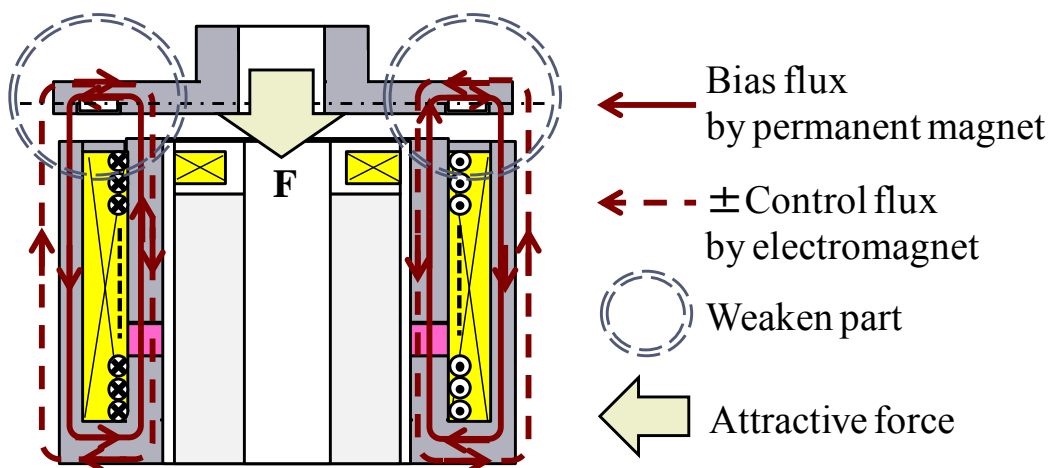


Fig. 2.7 Control of weak attractive force by control flux.

Fig. 2.6, 2.7 の制御をロータの軸方向両端で行うことでロータを目標浮上位置にプッシュアップ的に浮上制御する[18, 19]。

2.2 磁気解析 - 解析モデル -

Fig. 2.4 で提案した磁気軸受モデルについて磁気解析を行う。磁気解析には 3 次元磁場解析ソフト (JMAG-Designer) を用い、各方向への変位時の復元力特性の確認を行う。Fig. 2.8 に磁気解析に用いた解析モデルを示す。ロータディスクとステータ内環及び外環部分には電磁軟鉄を設定した。Table 2.1 に電磁軟鉄を含めたそれぞれ設定したパラメータを示す。

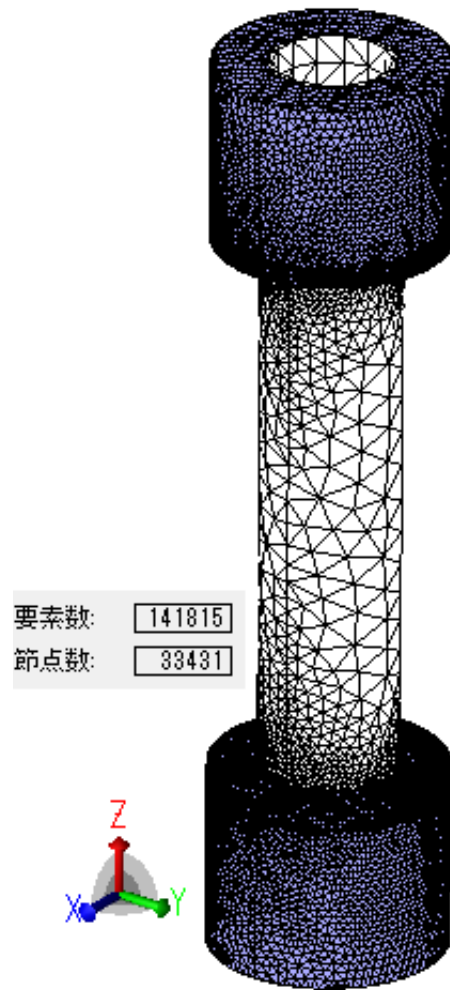


Fig. 2.8 Magnetic analysis model.

Table 2.1 Parameter of magnetic analysis.

Rotor disk	SUY-1
Stator	
Magnet	N40M
Coil	Copper
Shaft	Plastic
Elemnts	141,815
Node	33,431

2.2.1 磁気解析 -軸方向変位-

ロータの軸方向（z 軸方向）への変位に対する 復元力の確認を行う。浮上用コイルに流れる電流の値を 0~1.25A まで変化させた時の各変位時のロータに働く吸引力（復元力）を測定する。ロータの変位は軸方向下側（z 軸負の方向）に変位させる。Fig. 2.9 に浮上コイルに流れる電流と吸引力（復元力）の関係を示す。Fig. 2.9 から変位が 0.30mm までであれば 1.25A までの電流においても復元力が働くことが分かる。

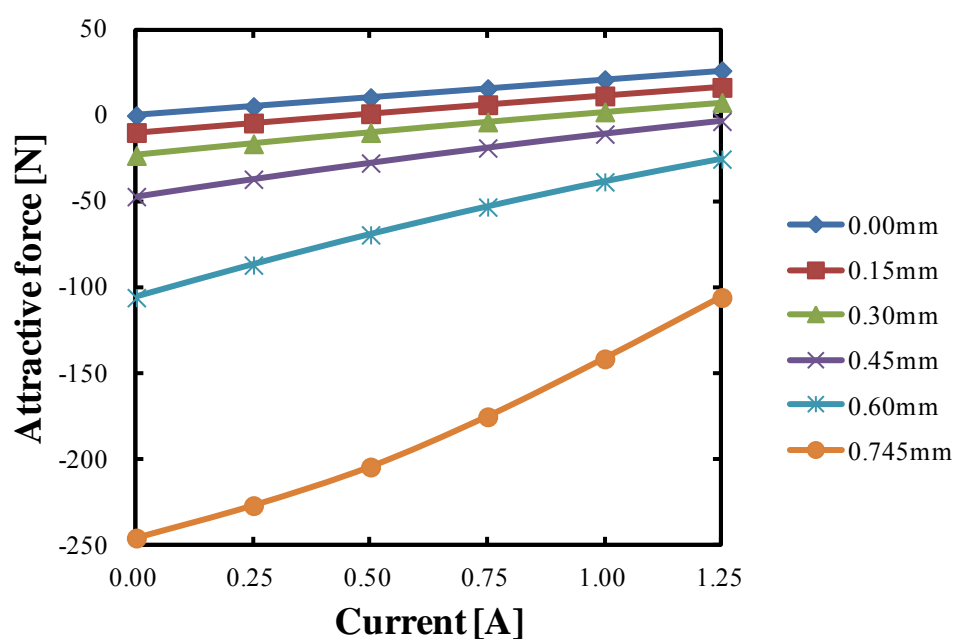


Fig. 2.9 Relationship between current and attractive force in the axial direction.

Fig. 2.10 に 0N 以上の吸引力が働いた部分について示す。Fig. 2.10 からロータの変位が 0.00mm の時、21N/m の力係数が得られていることがわかる。

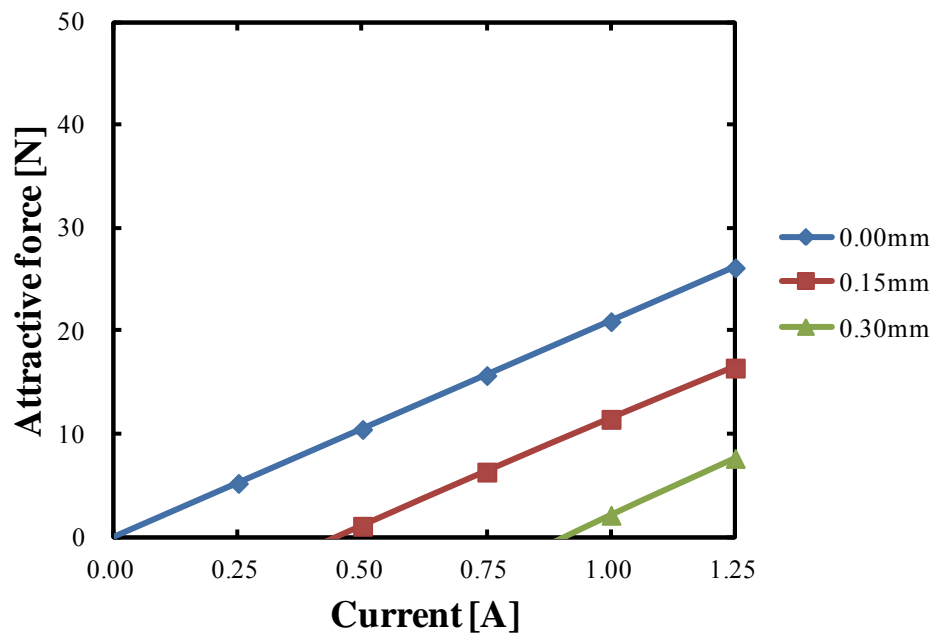


Fig. 2.10 Force coefficient of attractive control.

2.2.2 磁気解析 - 半径方向変位 -

ロータの半径方向（x 軸方向）への変位に対する 復元力の確認を行う。浮上用コイルに流れる電流の値を 0.00~1.25A まで変化させた時の各変位時のロータに働く吸引力（復元力）を測定する。ロータの変位は x 軸方向正の方向に変位させる。Fig. 2.11 に浮上コイルに流れる電流と吸引力（復元力）の関係を示す。Fig. 2.11 から x 軸方向に変位させても復元力が殆ど働かないことがわかる。これは、軸方向は能動的に制御を行っているものの、半径方向はロータ・ステータ形状によって受動的に僅かに吸引力が発生しているのみであるためと考えられる。また、復元力を向上させるためには永久磁石による磁気カップリング等の受動支持が必要である。

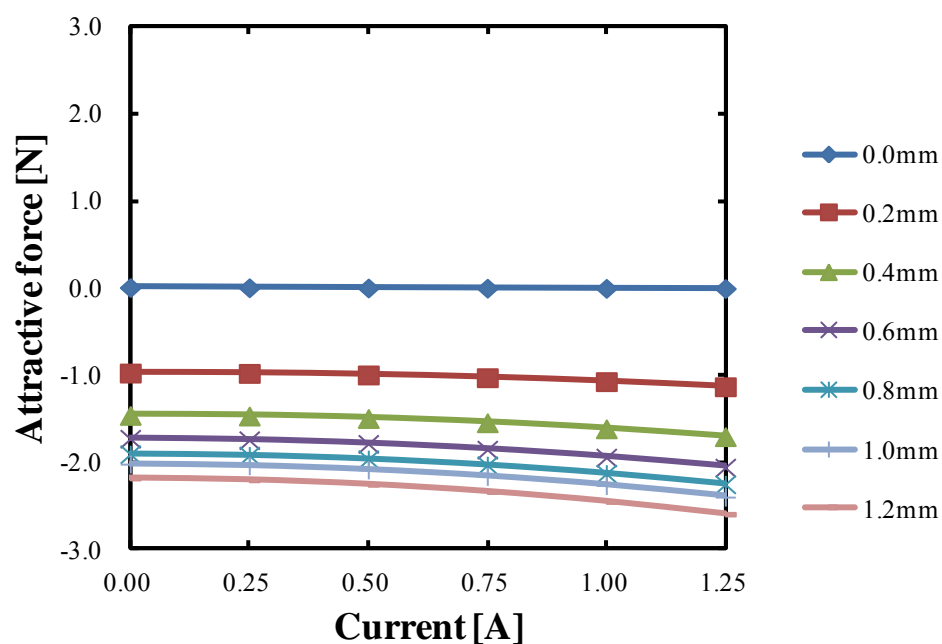


Fig. 2.11 Relationship between current and attractive force in the radial direction.

2.2.3 磁気解析 - 傾き方向変位 -

ロータの傾き方向への変位に対する復元力の確認を行う。浮上用コイルに流れる電流の値を 0~1.25A まで変化させた時の各変位時のロータに働く吸引力（復元力）を測定する。ロータの変位は x 軸回り CW の方向に変位させる。Fig. 2.12 に浮上コイルに流れる電流と吸引力（復元力）の関係を示す。Fig. 2.12 から 0.6 deg までの傾き変位であれば復元力が働くが、それ以上の変位ではより傾く方向に力が働くことが分かる。これに関しても軸方向は能動的に制御を行っているものの、傾き方向はロータ・ステータ形状によって受動的にわずかに吸引力が発生しているのみであるためと考えられる。

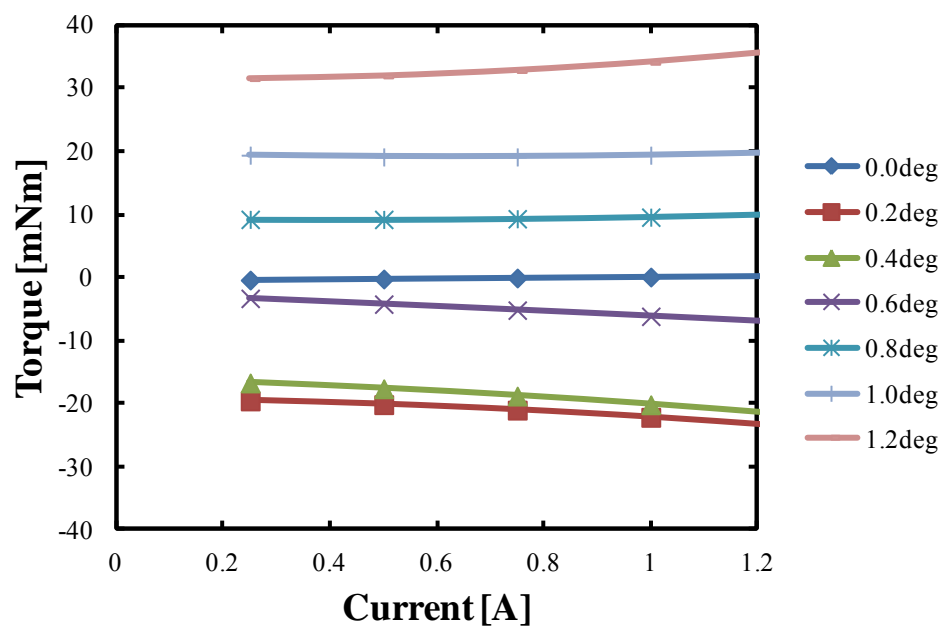


Fig. 2.12 Relationship between current and torque in the slant direction.

2.3 浮上システム

Fig. 2.13 に提案する磁気軸受の浮上システム構成を示す。ロータの浮上位置は一組のセンサを用いて測定する。変位センサからの変位信号を PID コントローラに入力し、制御信号を生成する。制御信号をパワーアンプに入力し、制御電流を浮上用コイルに励磁する。

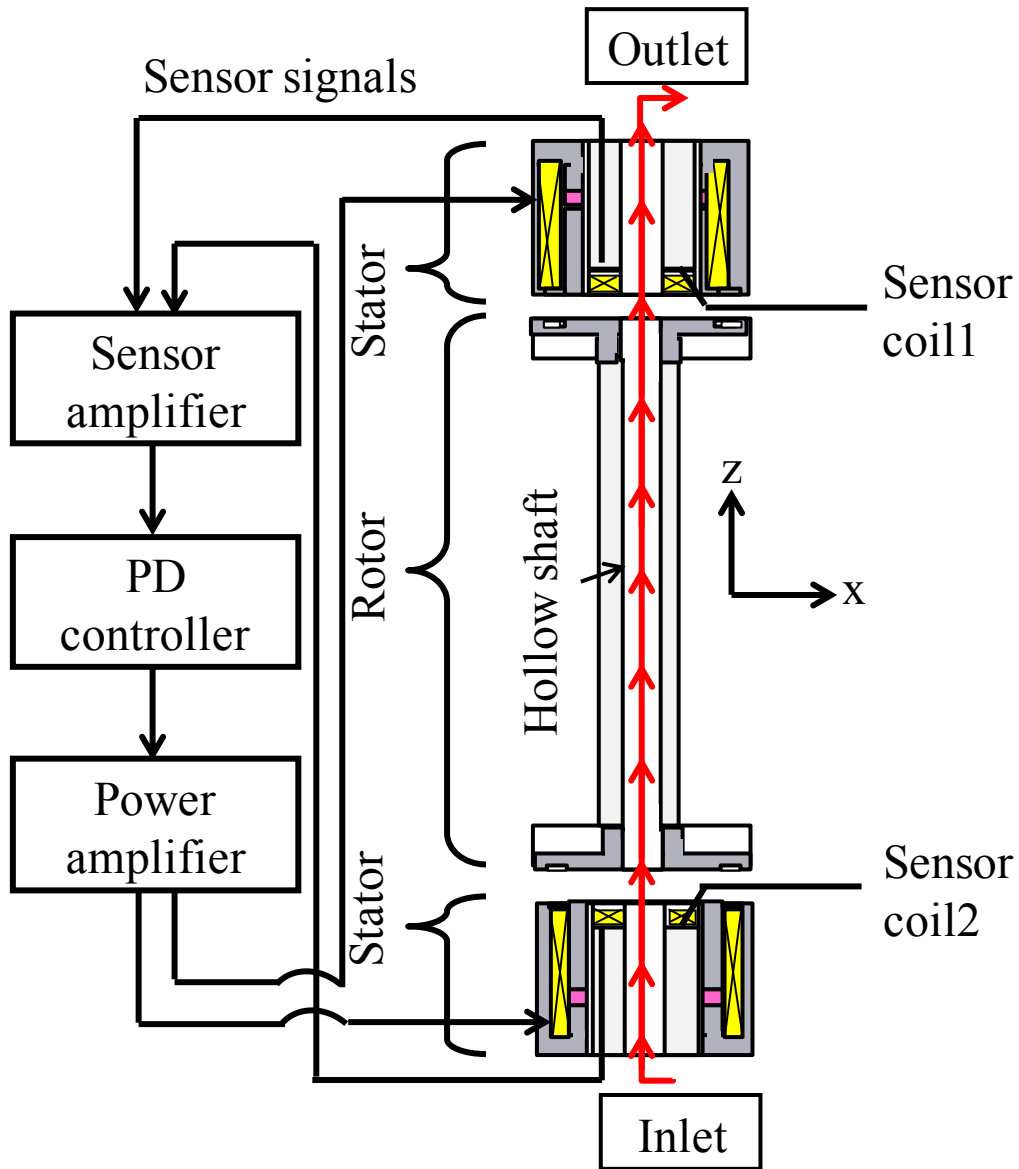


Fig. 2.13 Levitation system of magnetic bearing.

2.4 PID コントローラ

Fig. 2.14 に浮上システムに用いる PID コントローラのブロック図を示す。Fig. 2.14 から本研究では PD 制御を用いている。これは PD 制御では定常偏差が残るものの、D 制御によって振動がし難くなり、P ゲインを大きくできるメリットがあるためである。これによって目標浮上位置への到達速度が速くすることが図れる[5, 20]。

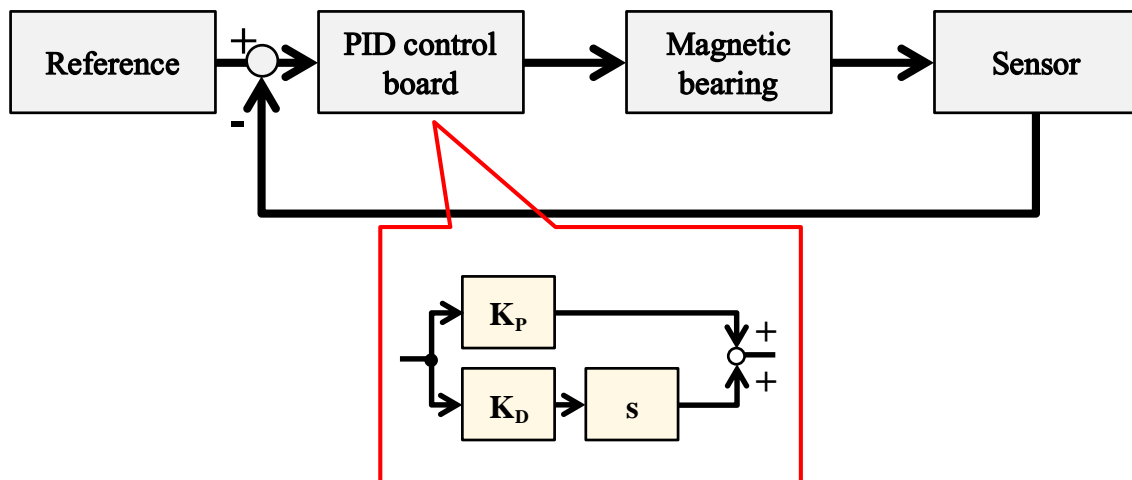
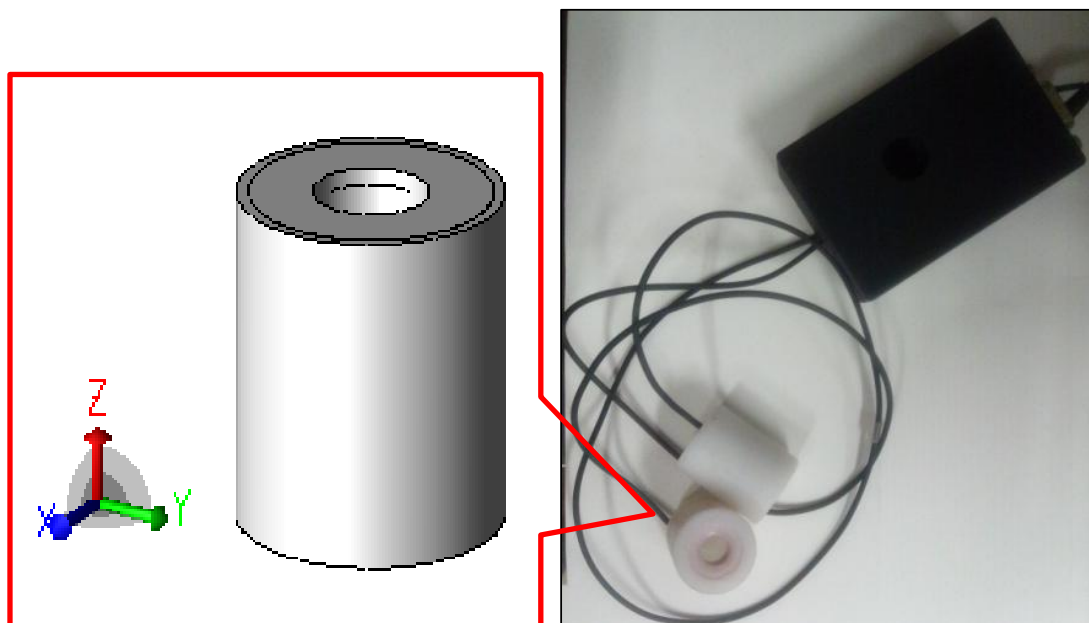


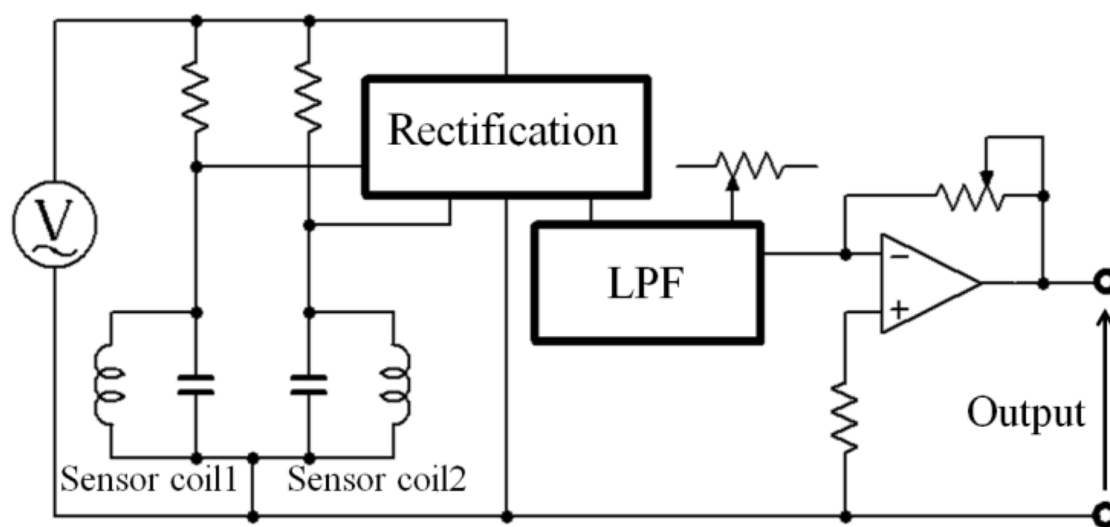
Fig.2.14 Block diagram of PID controller.

2.5 変位センサ

Fig. 2.15 に浮上システムに用いる変位センサを示す。Fig. 2.15(a)より変位センサはセンサコイル 1, 2 から成る一組の変位センサであり、センサコイル 1, 2 のそれぞれの相互インダクタンスの差を電圧として出力するインダクタンス型の変位センサである。また, Fig. 2.15(b)の回路図に示されているように二つのセンサコイル部分がブリッジ構造のため安定度が高いことや、使用温度範囲が広い、消費電流が 30 mA 以下と非常に小さい等のメリットがある。この変位センサもロータと同径の中空軸構造を持っている。



(a) Sensor coil



(b) Sensor circuit

Fig. 2.15 Displacement sensor using levitation system.

Fig. 2.16 に変位センサの有用性を確認するための実験構成の概略図を示す。二つのセンサコイルと変位センサの中空軸と同直径の中空軸を持つセンサターゲットをエアギャップを持たせて配置する。エアギャップは 0.75 mm である。センサターゲットを z 軸方向に変

位させた時の出力電圧を測定する。Fig. 2.17 にセンサターゲットの変位とその時の電圧出力の関係を示す。Fig. 2.17 から電圧出力は変位に対して線形であることから、本研究の使用範囲において有用性があることを確認した。

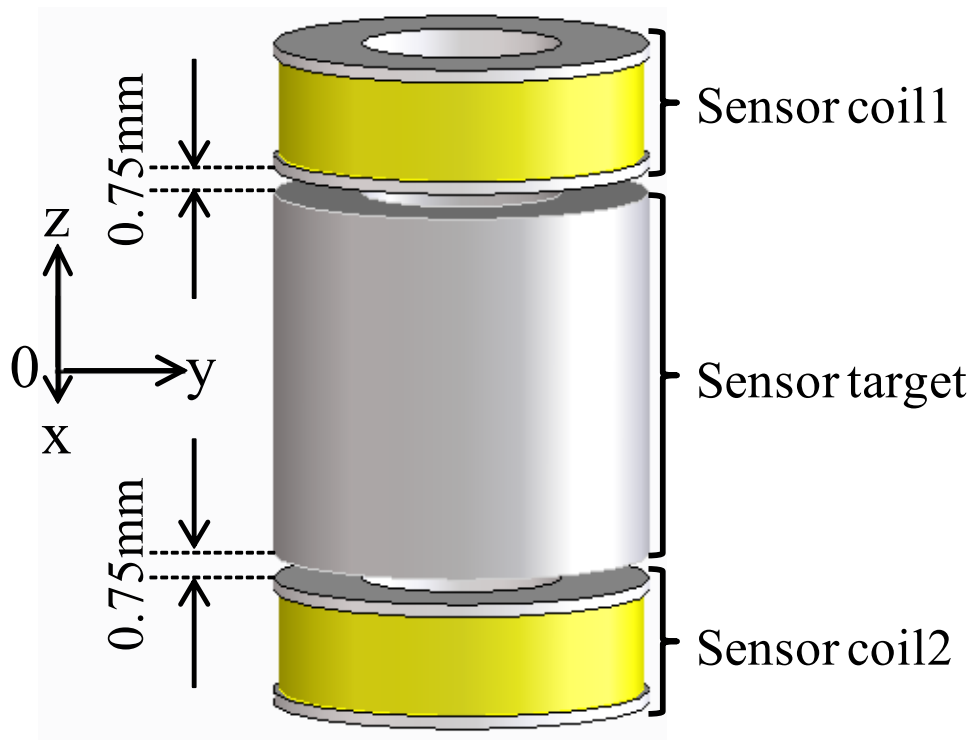


Fig. 2.16 Schematic diagram of experiment constitution.

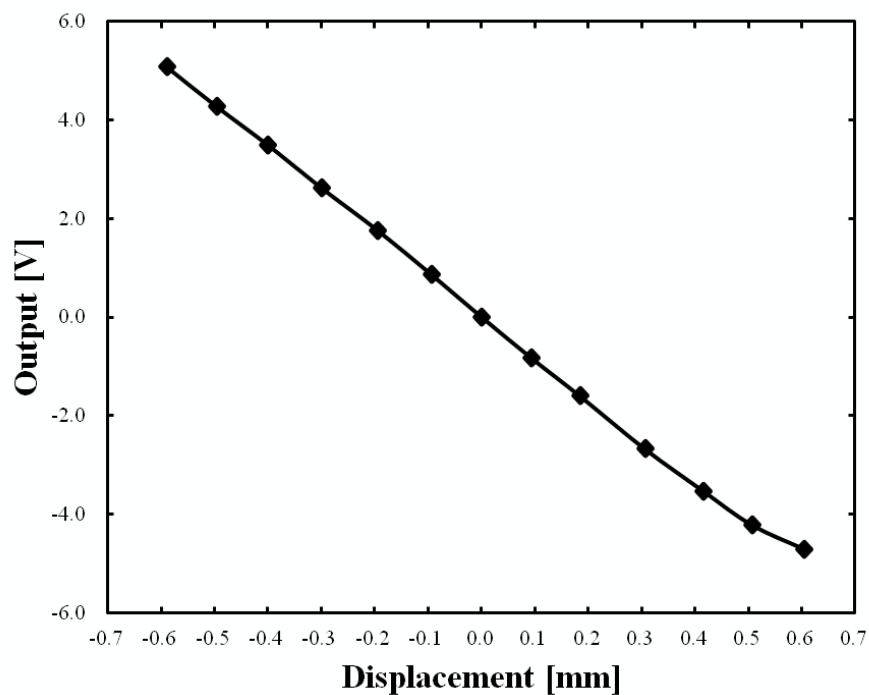


Fig. 2.17 Relationship between displacement and output voltage.

2.6 変位センサ - 浮上コイルの影響 -

次に浮上コイルからの漏れ磁束の影響について磁気解析ソフトを用いて確認を行う。

Fig.2.18 に安定浮上と半径方向変位時における漏れ磁束の磁気解析結果を示す。浮上コイルに流れる電流は 0.25 A とした。Fig. 2.18 から安定浮上時及び半径方向変位時において漏れ磁束が見られるものの、変位センサの測定部分には影響がないことがわかる。

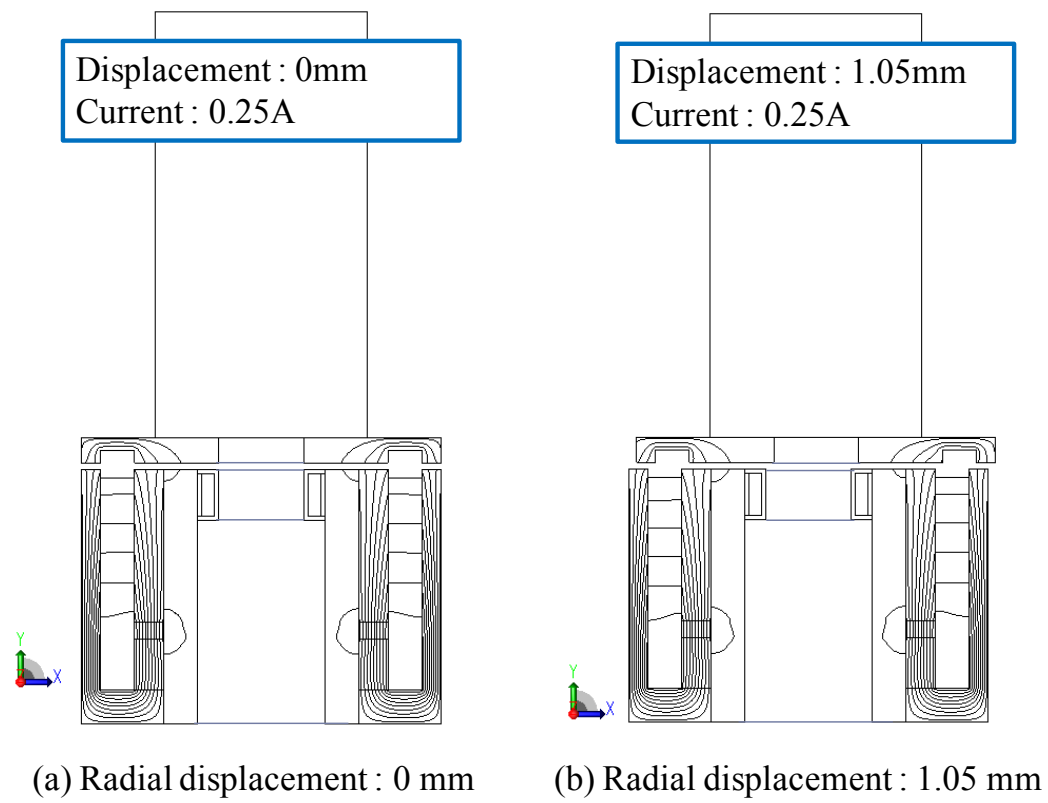


Fig. 2.18 Magnetic analysis of leakage flux.

第 3 章 磁気軸受の作製と評価実験

本章では第 2 章の評価結果から磁気軸受を作製し、その評価実験について述べている。磁気解析の結果から主な材料として電磁軟鉄とジュラコンから磁気軸受を作製している。作製した磁気軸受を用いて軸方向吸引力を測定し、磁気解析の結果と比較を行っている。磁気浮上システムを用いて擬似的なインパルス外乱、ステップ外乱に対する制御性の評価を行っている。また、浮上制御時に 4 極 8 スロットから成るモータによる基礎的な回転駆動を行い、回転駆動時の軸方向及び半径方向の変位について評価を行っている。

3.1 磁気軸受の作製と軸方向吸引力

Fig. 3.1 に磁気解析結果を基に作製したステータを示す。ステータは内環部と外環部のかから成るシリンダー状の電磁軟鉄製の電磁石（256 巻の浮上コイルを含む）とリング状のネオジウム系永久磁石から構成される。Fig. 3.2 に第 2 章の磁気解析の結果を基に作製したロータを示す。ロータは溝が設けられた電磁軟鉄製のロータディスクとロータディスクを繋ぐジュラコン製のロータシャフトから構成される。Table.3.1 に作製した磁気軸受のパラメータを示す。

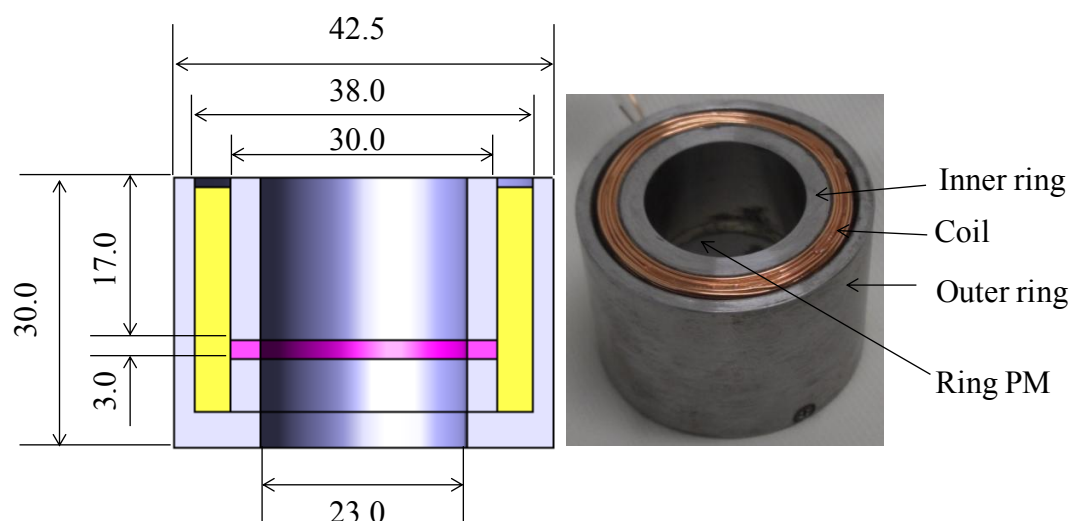


Fig. 3.1 Developed stator.

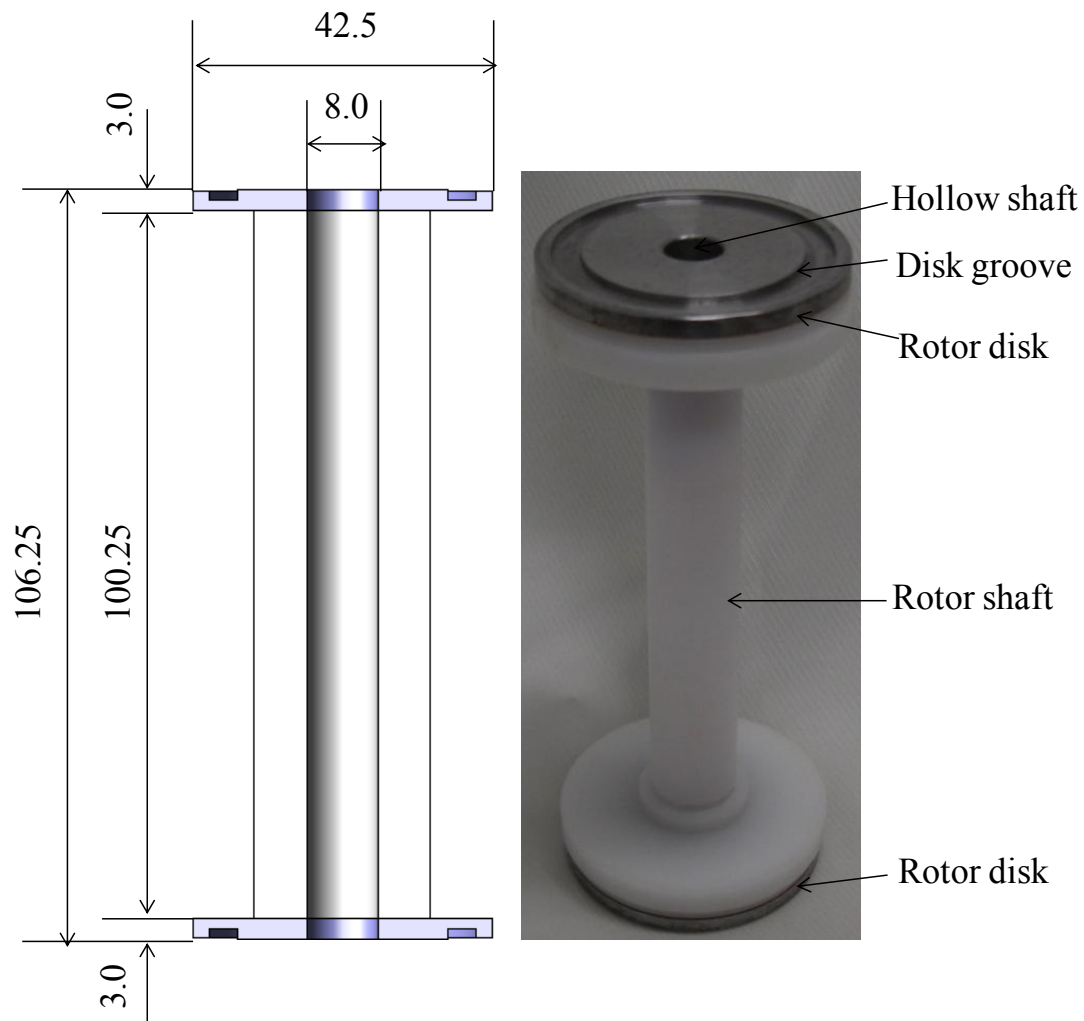


Fig. 3.2 Developed rotor.

Table 3.1 Parameter of developed magnetic bearing.

Rotor mass	120 g
Diameter of a hollow shaft	8.0 mm
Coil turns	266 turns
Diameter of coil	0.5 mm
Air gap	0.75 mm
Surface magnetic flux density of ring PM	322 mT

作製した磁気軸受が磁気解析結果と同様の結果が得られるか確認するため、軸方向（z 軸方向）の吸引力の測定を行う。測定は作製した磁気軸受の片側のステータ及びロータディスクを使用し浮上コイルに流れる電流を変化させながらロータディスクに働く吸引力をフォースゲージにて測定する。測定した吸引力から両端でプッシュプル的に吸引力が働いたものとして磁気解析結果と比較する。エアギャップは解析同様 0.75 mm となる様に設置する。Fig. 3.3 に浮上コイルに流れる電流と吸引力の関係について、磁気解析と実測の比較を示す。Fig. 3.3 から実測結果も線形性が見られるものの、力係数に関して磁気解析結果との誤差が見られた。これは磁気解析において設定する素材の特性が実際とはわずかに異なることや、作製時の加工誤差、組立誤差等を考慮していないためだと考えられる。しかし、Fig. 3.3 の結果から今回の使用範囲において磁気解析結果から作製物の特性を十分評価できていると考えられる。

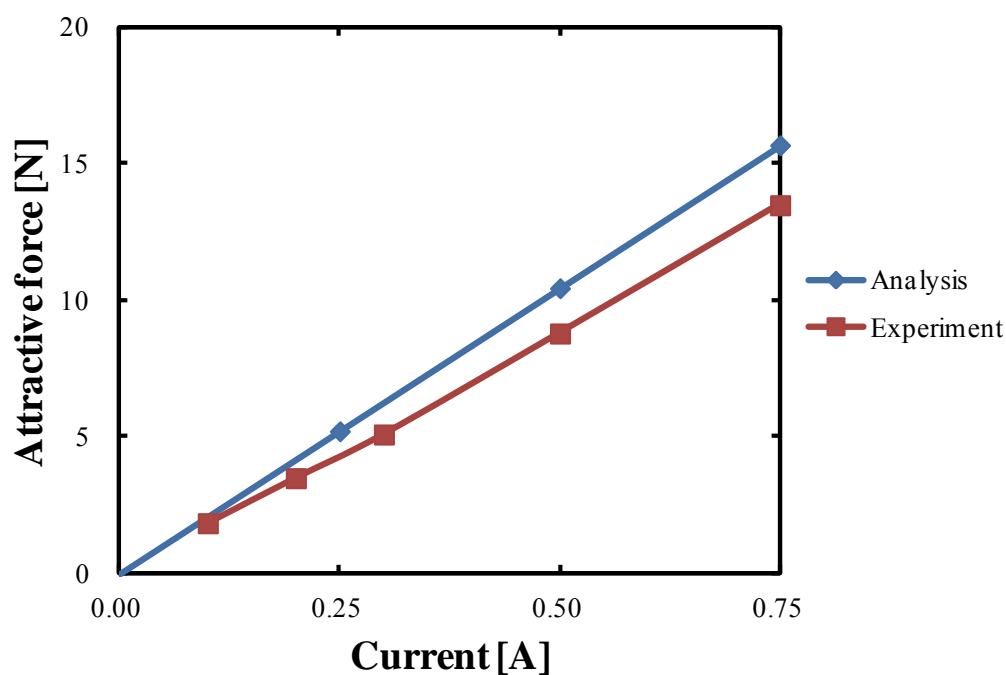


Fig. 3.3 Relationship between current and attractive force.

3.2 インパルス応答試験

作製した磁気軸受の浮上性能を確認するため、浮上時のゲインの測定、インパルス応答実験、ステップ応答実験を行う。まず第2章の磁気解析及び浮上システムから軸方向制御のための制御ゲインは試行錯誤的に決定した。Table 3.2に決定した各ゲインを示す。Table

3.2から比例ゲインは3.14 A/mm, 微分ゲインは0.13 As/mm である。

Table 3.2 Parameter of P and D gains.

Parameter	
K_p	3.14 A/mm
K_D	0.13 As/mm

ロータを軸方向の一軸のみで浮上制御した状態で、浮上用コイルに外乱として擬似的なインパルス力を印加した場合のインパルス応答を測定する。実験ではロータ、ステータ間のエアギャップの1/3 程度の振幅になるようにインパルス力を与える。Fig. 3.4に浮上システムの外乱の印加位置を、Fig. 3.5にインパルス応答試験の結果を示す。Fig.3.4から、インパルの印加位置はPD制御とパワーアンプの間である。Fig. 3.5からインパルス応答の振幅は約0.25 mm, 静定時間は約0.05 s となっていることが分かる。エアギャップの1/3 程度の振幅を持つインパルス力を与えたにもかかわらず、良好な即応性を確認することができた。

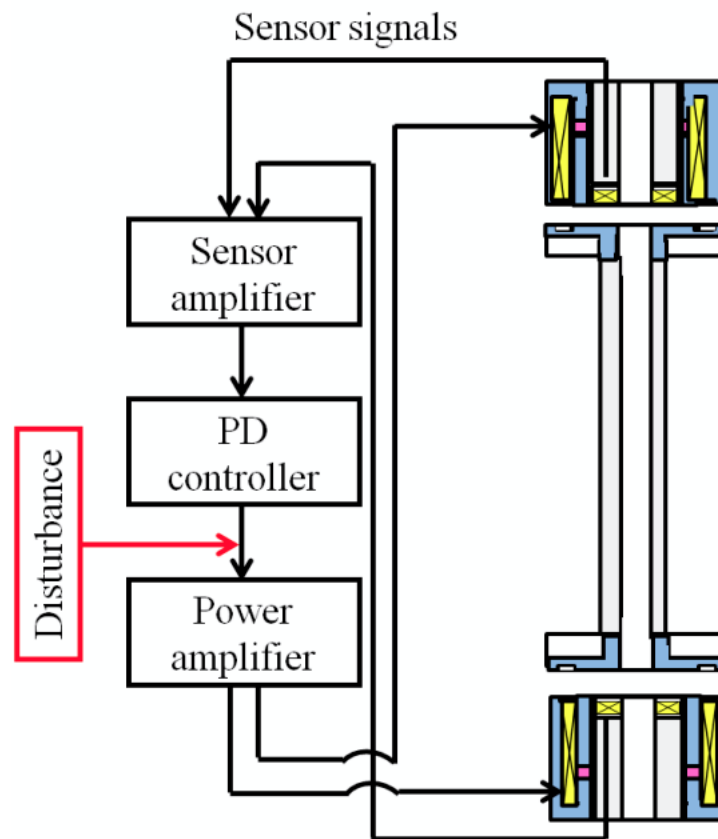


Fig.3.4 Relationship between levitation system and disturbance.

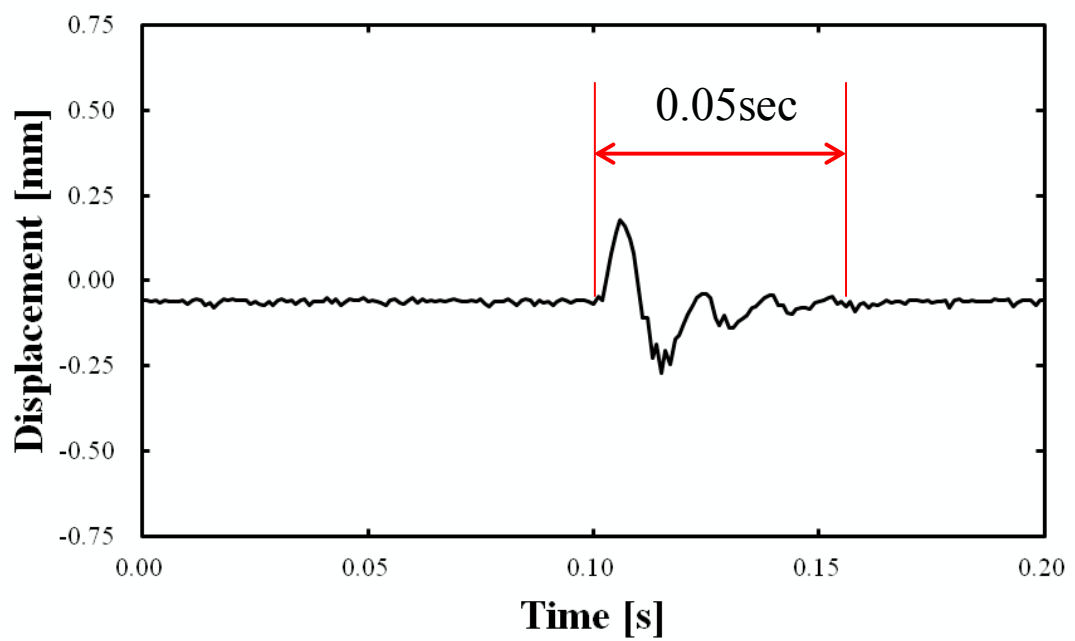


Fig.3.5 Result of impulse response experiment.

3.3 ステップ応答試験

ロータを軸方向の一軸のみで浮上制御した状態で、浮上用コイルに外乱として擬似的なステップ信号を印加した場合のステップ応答を測定する。実験ではロータ、ステータ間のエアギャップに0.10 mm程度の振幅となるようにステップ信号を与える。ステップ信号の入力位置はFig.3.4と同様である。Fig. 3.6にステップ応答試験の結果を示す。Fig. 3.6からステップ応答の振幅は約0.10 mm、静定時間は約0.01 s となっていることがわかる。こちらも良好な即応性を確認することができた。

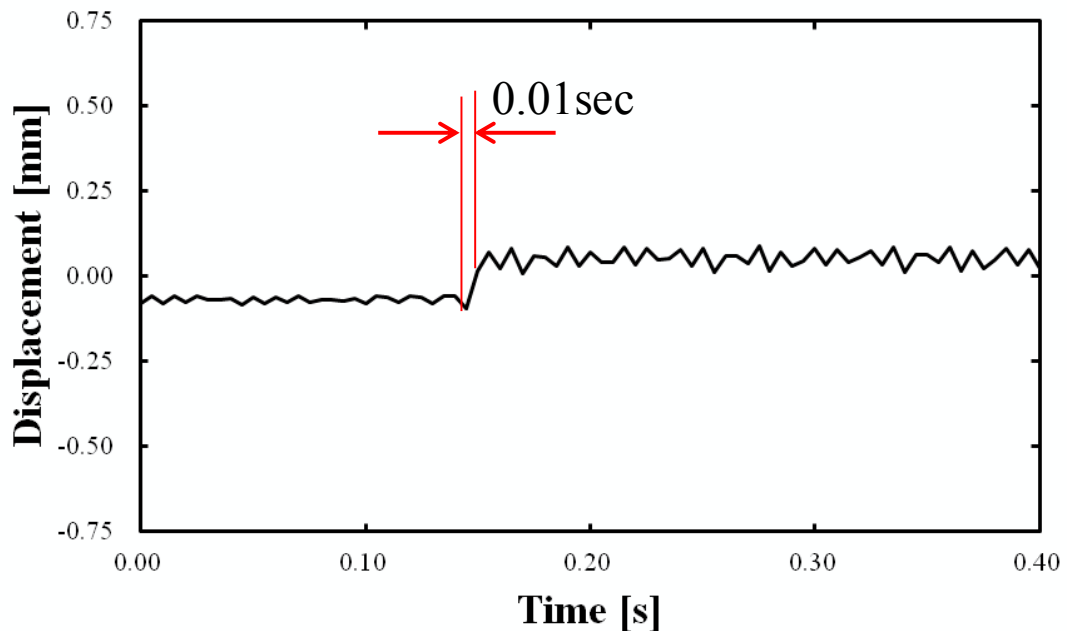


Fig. 3.6 Result of step response experiment.

また、Fig. 3.5 と Fig. 3.6 より、インパルス力やステップ状の外乱を与える前の安定浮上時において、目標浮上位置（0 位置）よりわずかに低い位置で安定浮上していることがわかる。これは、PD 制御によって定常偏差が残っていることと、上下のステータで特性が等しくためだと考えられる[12 - 14]。

3.4 浮上回転実験

一軸浮上制御磁気軸受において基礎的な浮上回転実験を行うため、Fig. 3.7 に示すモータ

の駆動システムを用いる。Fig. 3.7 よりロータ側の片側 4 極のゴム磁石と、ステータ側の片側 8 スロットの空芯コイルからモータを構成する。基礎的な浮上確認を行うため、ロータには加工が比較的容易な点から、磁化方向厚さ 3.0 mm のゴム磁石を用いる。空芯コイルは線直径 0.3 mm で各 128 巻である。Fig. 3.8 にゴム磁石と空芯コイルの配置を、Fig. 3.9 にコイルへの励磁パターンの一例を示す。ゴム磁石とコイルは向き合うように配置されている。ゴム磁石と空芯コイルが向き合う際は空芯コイルに電流は流れず、ゴム磁石が空芯コイル間に位置した際は Fig. 3.9 に示すように空芯コイルの極を切り替えることで 22.5° ずつ回転させる[13, 14]。

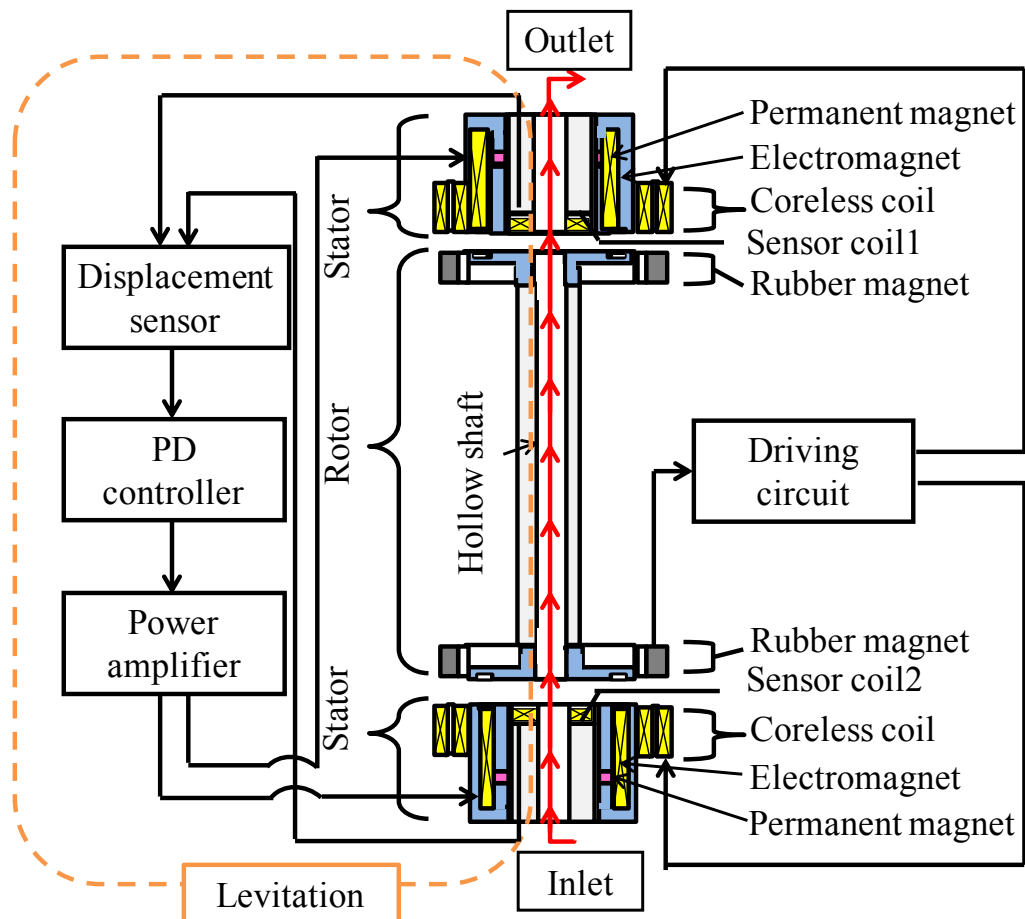


Fig.3.7 Levitation system and motor drive system.

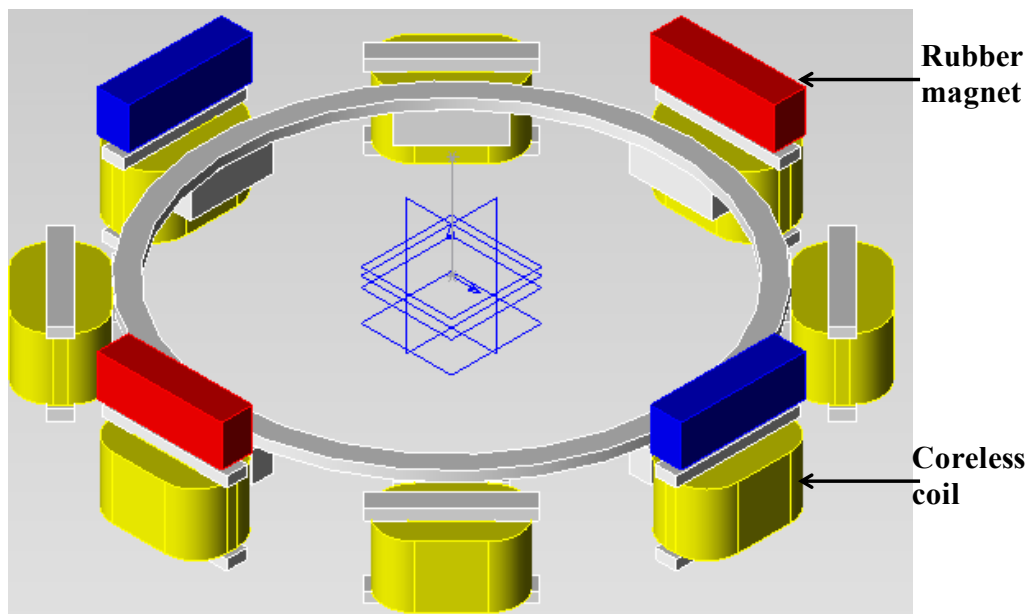


Fig.3.8 Layout of rubber magnet and coreless coil.

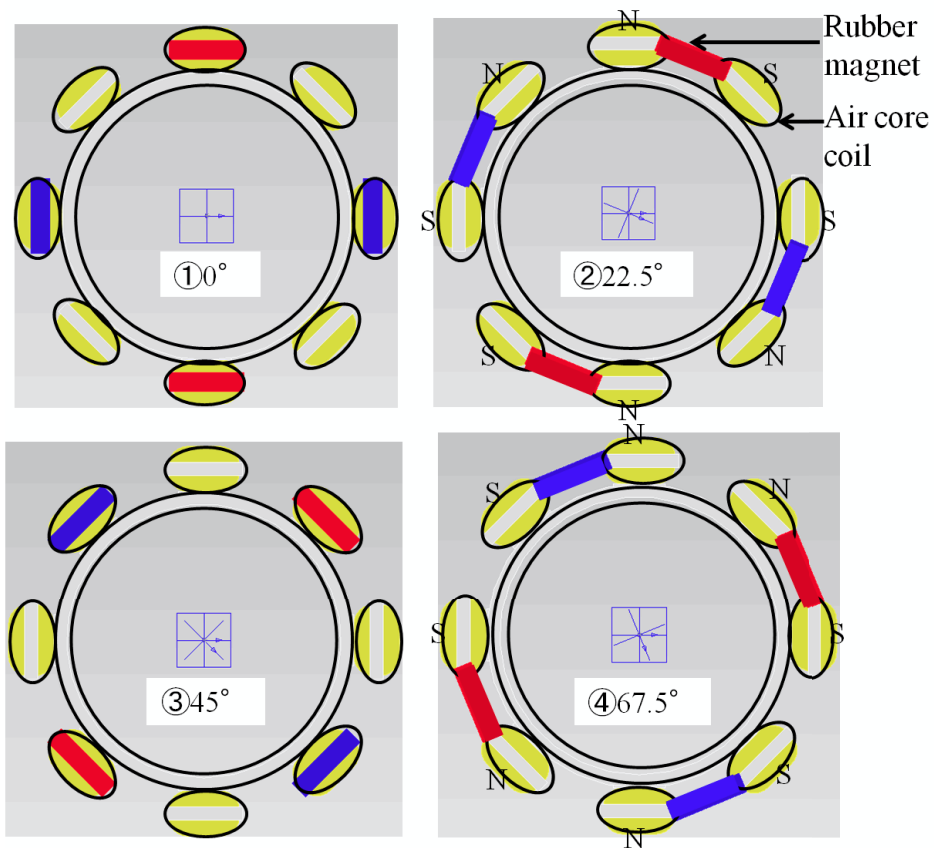


Fig.3.9 Pattern of motor drive.

3.5 浮上回転結果

Fig. 3.10 に浮上回転時の実験の様子を示す。Fig. 3.10 よりロータの外周部にゴム磁石が，ステータの外周部に空芯コイルが取り付けられていることが分かる。ロータ中央部の黒い部分は回転を測定するためのものである。

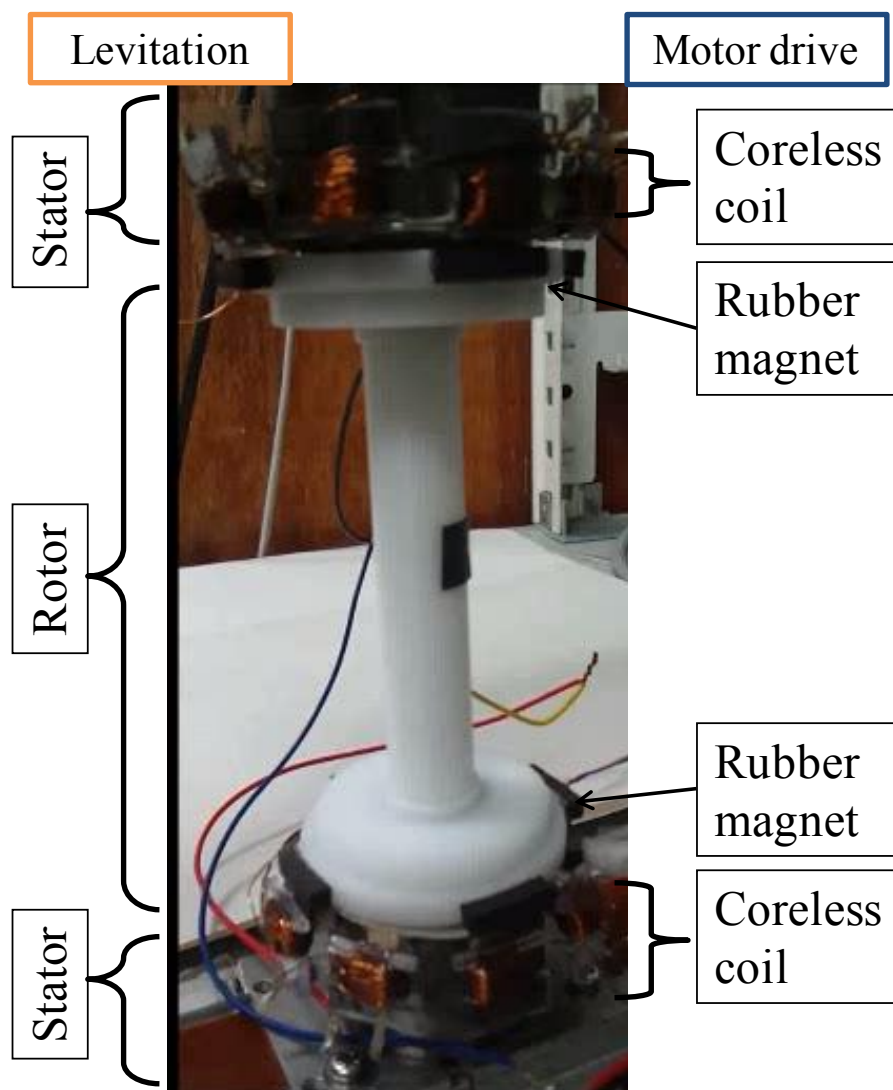
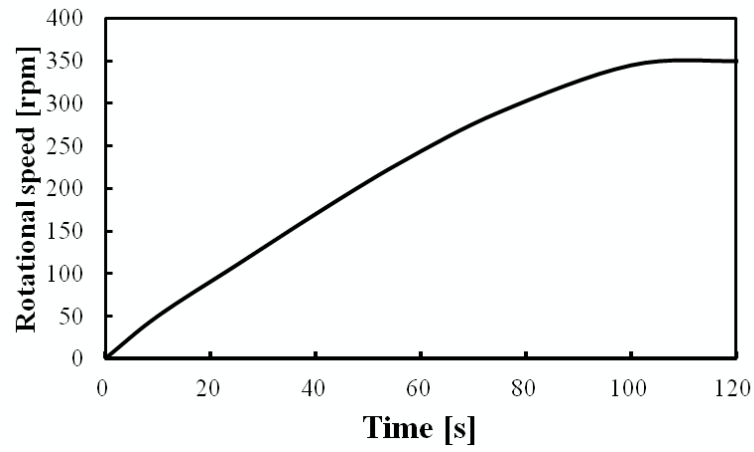
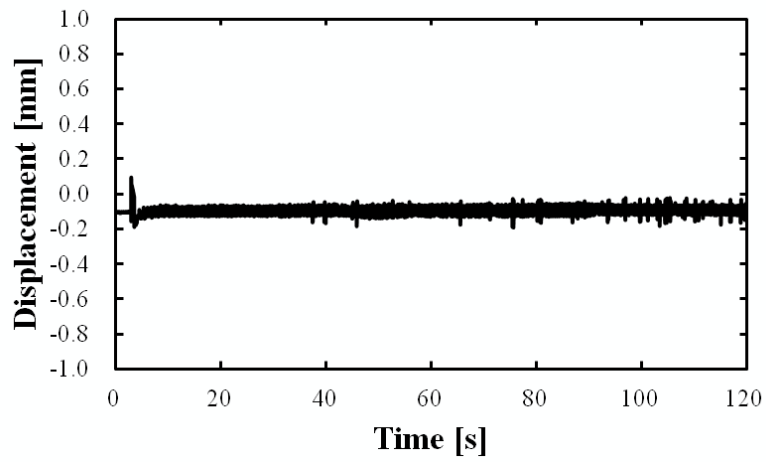


Fig. 3.10 Levitation and rotation experiment.

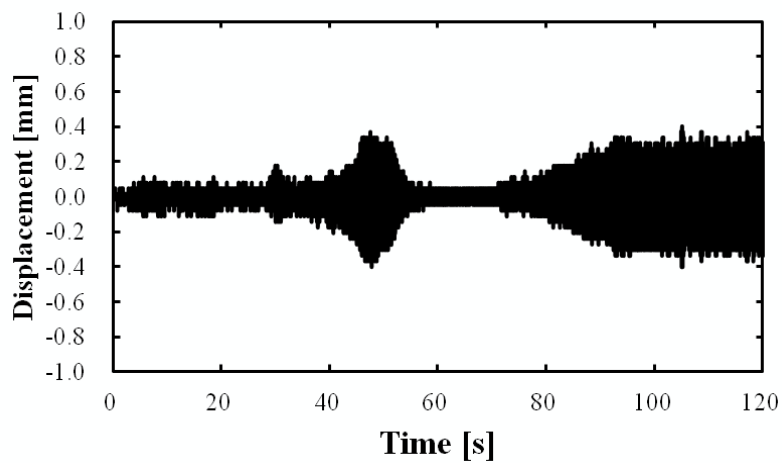
また，Fig. 3.11 に回転数及び軸方向と半径方向への変位の関係を示す。Fig. 3.11(a)より回転数が次第に上昇し，最大 350rpm で回転していることがわかる。Fig. 3.11(b)より回転数が上昇しても軸方向の変位は 0.2 mm 以下と小さいことがわかる。Fig. 3.11(c)より回転数が上昇するにつれて半径方向変位が大きくなっていることがわかる[13, 14]。



(a) Rotational speed



(b) Displacement in the axial direction



(c) Displacement in the radial direction

Fig. 3.11 Result of levitation and rotation experiment.

第 4 章 半径方向の受動支持方式

本章では第 2 章、第 3 章において検討が不十分であった半径方向の受動支持について有限要素法解析による磁気解析によって改善案を提案している。磁気カップリングによる受動支持について、ロータ側とケーシング側にリング状の磁石を設けている。リング状の磁石の着磁方向と磁石個数を変更して評価している。また、ステータ内環に収められているリング状永久磁石についての磁石位置を変更して検討している。

4.1 半径方向受動支持

第 2 章の磁気解析と第 3 章の浮上回転実験において、提案する磁気軸受の半径方向支持が問題となっている。本研究では軸方向の一軸のみを永久磁石と電磁石から成るステータで能動制御を行っており、半径方向及び傾き方向は軸受構造によって受動支持されているのみである。そのため、半径方向への加振や浮上回転時の外乱に対して十分に支持できていないと言える。

そこで半径方向の受動支持方式について検討を行う。半径方向を受動的に支持するためケーシングとロータ側に磁石を設置して磁気カップリングによって受動支持する方式を採用する。磁気カップリングは反発型磁気軸受（RMB）とも呼ばれ、半径方向を永久磁石等の反発力で受動的に支持する。Fig. 4.1 にケーシングとロータ側の磁気カップリングによる半径方向の受動支持原理の概略図を示す。摩擦・摩耗がない、メンテナンスが不要等の能動型磁気軸受の利点を有するとともに、制御設備等の簡素化によりコストの削減が可能、装置全体の小型化が可能という利点がある[15]。ケーシングの内周面とロータの外周面に設置した円筒状の磁石によって磁気カップリングが形成される。ロータが半径方向（ x 方向）に変位した際、磁石から発生するバイアス磁束により半径方向に対し復元力が作用し受動的に支持される。ケーシングとロータ間のエアギャップは 0.8 mm を想定する。また Fig. 4.1 に示されるように、磁石の着磁方向を変化させた時の復元力の違いを磁気解析によって求める。ロータディスクには SUY-1 を、シャフト及びケーシングにはプラスチックを設定した。磁気カップリングの磁石にはフェライトラバー RMS-21 を設定している。着磁方向は矢印で表す。Fig. 4.1(a)は内環側と外環側の着磁方向が対向している（ x 方向着磁）。Fig. 4.1(b)は内環側と外環側の着磁方向がともに軸方向（ z 方向着磁）となっている。

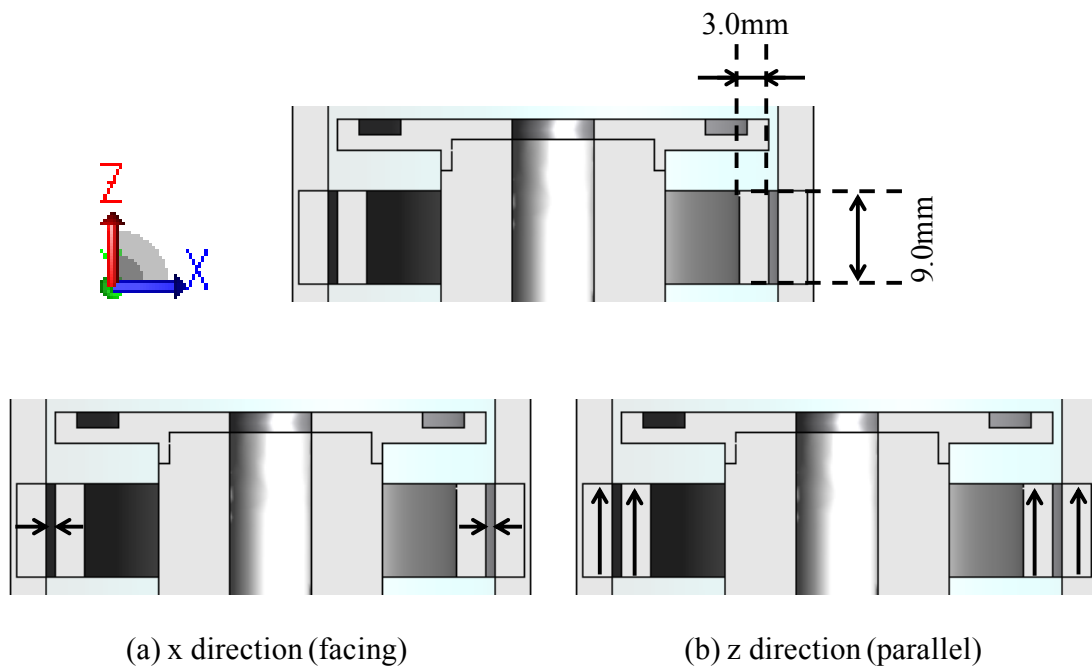


Fig. 4.1 Schematic diagram of passive support principle and magnetized direction.

Fig. 4.2 に着磁方向の違いによる復元力の解析結果を示す。ロータを x 軸の正の方向へ $0 \sim 0.7 \text{ mm}$ まで 0.1 mm ずつ変位させた時の復元力の関係を示している。Fig. 4.2 から変位に対して線形に復元力が働いていることがわかる。また、ロータに働く吸引力に関して、 z 軸方向に着磁をしている方がわずかに大きいことがわかる。

Fig. 4.3 に複数の磁石を用いて磁気カップリングを構成する場合の半径方向の受動支持原理の概略図を示す。Fig. 4.3(a)は内環側と外環側の着磁方向が対向している (x 方向着磁)。Fig. 4.3(b)は内環側と外環側の着磁方向が共に軸方向 (z 方向着磁) となっているが中央部分の磁石を電磁軟鉄 (SUY-1) に変更している。Fig. 4.3(c)は内環側と外環側の着磁方向が共に軸方向となっているのは Fig. 4.3(a)と同様であるが、中央部分の磁石を電磁軟鉄 (SUY-1) に変更している。

Fig. 4.4 に着磁方向の違いによる復元力の解析結果を示す。ロータを x 軸の正の方向へ $0 \sim 0.7 \text{ mm}$ まで 0.1 mm ずつ変位させた時の復元力の関係を示している。Fig. 4.4 から変位に対して線形に復元力が働いていることがわかる。また、 x 軸方向に着磁をしている Fig. 4.3(a), (c)の方が z 軸方向着磁より復元力が大きいことがわかる。

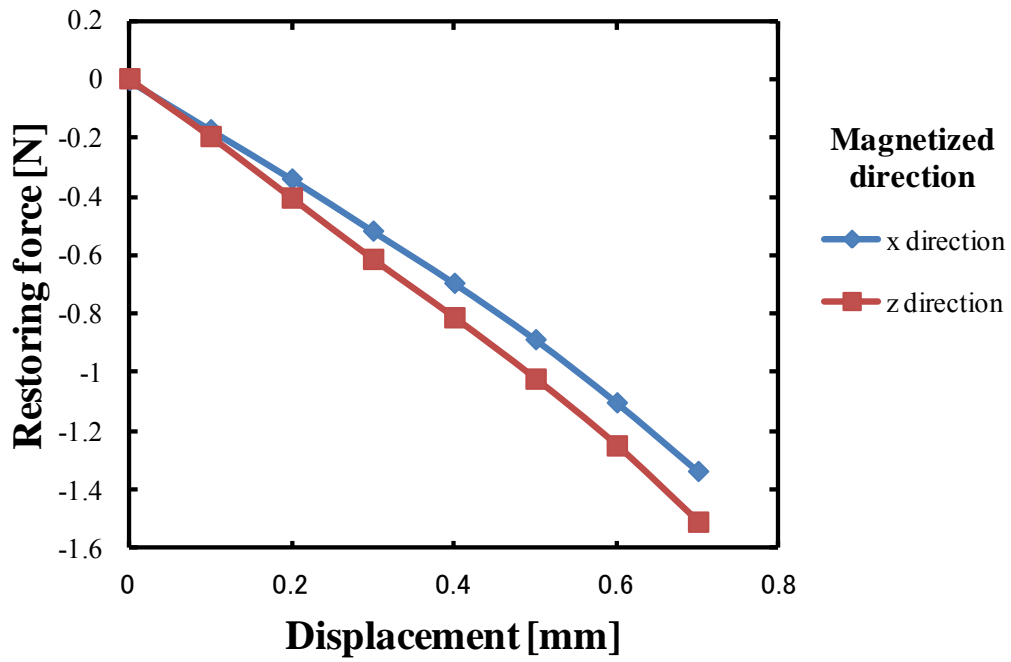


Fig. 4.2 Relationship between displacement and restoring force.

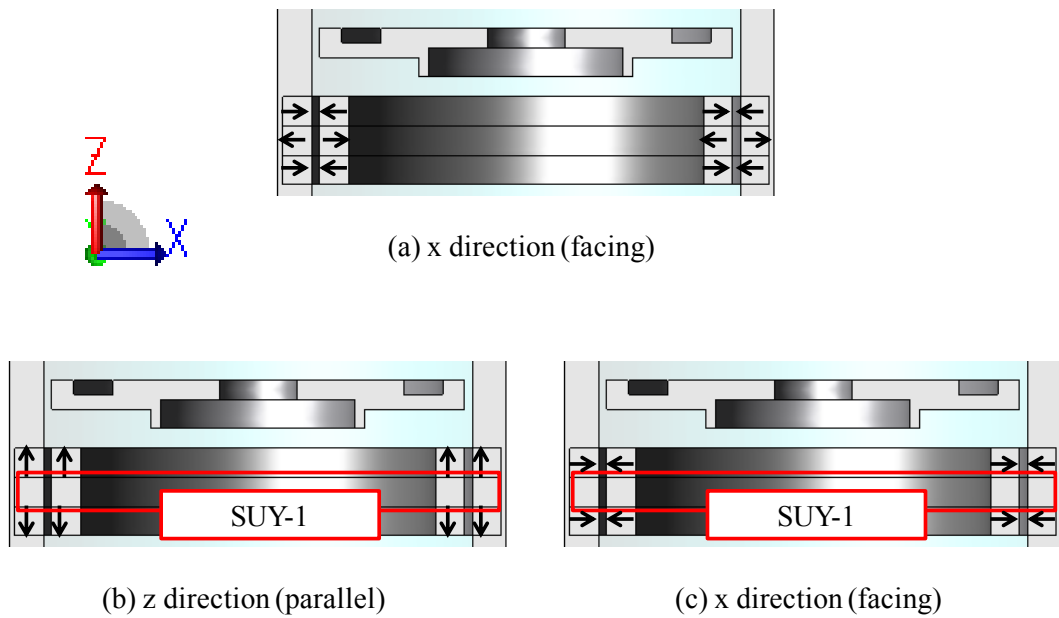


Fig. 4.3 Schematic diagram of passive support principle and magnetized direction.

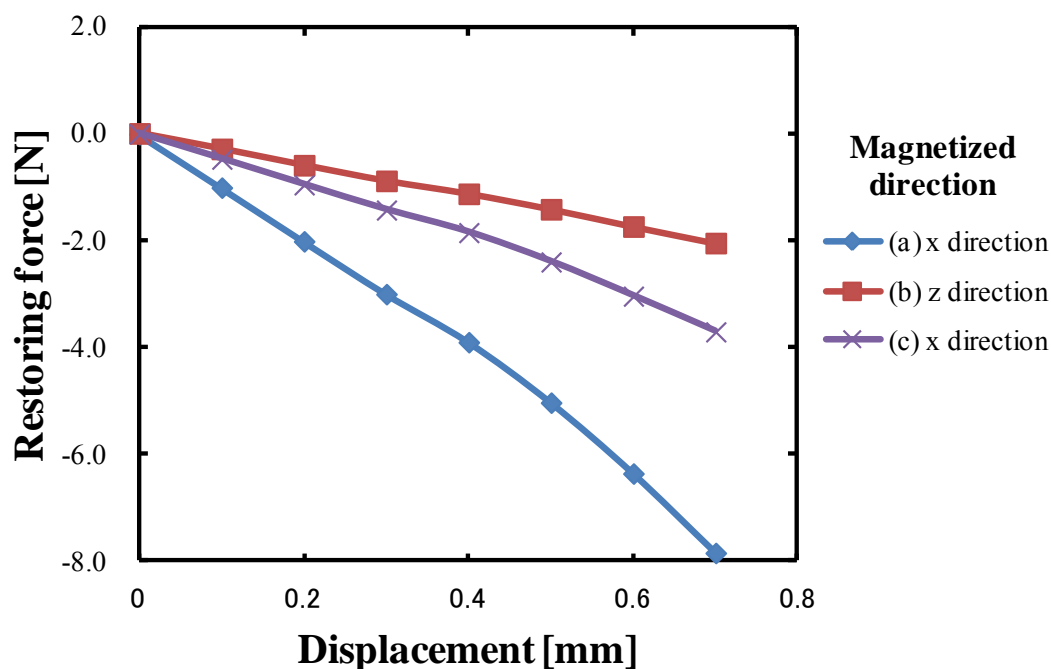


Fig. 4.4 Relationship between displacement and restoring force.

4.2 ステータ内永久磁石位置検討

4.1 節で磁気カップリングを用いた半径方向受動支持方法の検討を行った。しかしながら、磁気カップリングによって受動安定となる軸の剛性は、能動型の比べて小さい。そのため、高負荷荷重が求められる装置や瞬時的な外乱が加わる装置での利用には適していない。さらに、磁気カップリングは磁石の反発力を利用しているため非線形性を有する。Backers は反発型磁気軸受の復元力特性を理論的に解析し、それがハードスプリング様式（漸硬系）の非線形剛性を有することを明らかにしている[16]。また、着磁方向を周期的に変化させて並べ、その周期と剛性、非線形特性の関係を調べた。また Yonnet[17, 18]は、ラジアル軸受、アキシアル軸受と磁気継ぎ手について、二つのリング状磁石を用いてさまざまな着磁方向、配置パターンの磁石の場合の剛性を調べた。復元力特性は、磁石の大きさやエアギャップ、製作時や組立時の誤差、軸方向への変位により変化し、これにより振動特性も変化すると考えられる[19]。これらの点については、例えば、Paden らは反発型磁気軸受のギャップを変化させた場合の半径方向剛性と軸方向剛性を調べたが線形特性の変化を明らかにするにとどまっており、非線形性の変化についてほとんど調べられていない[20]。

そこで軸方向制御のための電磁石によって形成される磁束について（制御磁束）、バイアス磁束を発生させるための永久磁石の磁気抵抗の影響をなくすことにより、電磁石により形成される磁束の損失を抑制し、大きな磁束を得ることで半径方向及び軸方向の高い復縁力を得ることを図る[21]。

第2章、第3章では永久磁石のN極から出た磁束は内環の電磁軟鉄、磁極面、エアギャップ、ロータディスク、エアギャップ、外環の電磁軟鉄を順に経た後、永久磁石のS極に戻る経路、つまり閉じた磁気回路（閉回路）を形成して軸方向に能動制御、半径方向及び傾き方向を受動支持していた。この様に磁路を二次元的に構成した場合、電磁石によって形成する制御磁束と永久磁石により生ずるバイアス磁束が共に同一の永久磁石を通る磁路を形成することとなり、電磁石によって形成する制御磁束が永久磁石の大きな磁気抵抗により弱められ、浮上制御や受動支持に必要な大きな磁束を得ることが困難となる。少ない制御用電磁石の磁束損失で、浮上物の軸方向の能動的な、半径方向及び傾き方向の受動的な安定性を図るため、制御磁束は永久磁石を避ける構造について磁気解析を行う[21]。本論文で提案した内環側にリング状の永久磁石を収めたものをモデルⅠとして(Fig. 4.5(a))、外環側に収めたものをモデルⅡ (Fig. 4.5(b))、浮上用コイルの下部に半径方向に着磁された永久磁石と、内環側、外環側に軸方向に着磁された薄型の永久磁石を収めたものをモデルⅢ (Fig. 4.5(c)) として磁気解析モデルを作成する。目標浮上位置での磁路と半径方向に1.0 mm 変位させた時の半径方向復元力について磁気解析を行う。

Fig.4.6 にⅠ, Ⅱ, Ⅲ モデルの半径方向変位時の復元力磁気解析結果を示す。Fig. 4.6 より、モデルⅢ が最も復元力が大きく、次いでモデルⅠであり、モデルⅡ が最も小さい結果となっていることがわかる。モデルⅢ は永久磁石数が多いため、永久磁石によるバイアス磁束、つまり浮上コイルに流れる電流が0 A の時、モデルⅠ, モデルⅡ と比較して復元力が大きいと考えられる。モデルⅠとモデルⅡ の差はわずかであるが、モデルⅠの永久磁石の表面積がモデルⅡ と比べて大きいため、モデルⅠの方が復元力が大きくなったと考えられる。

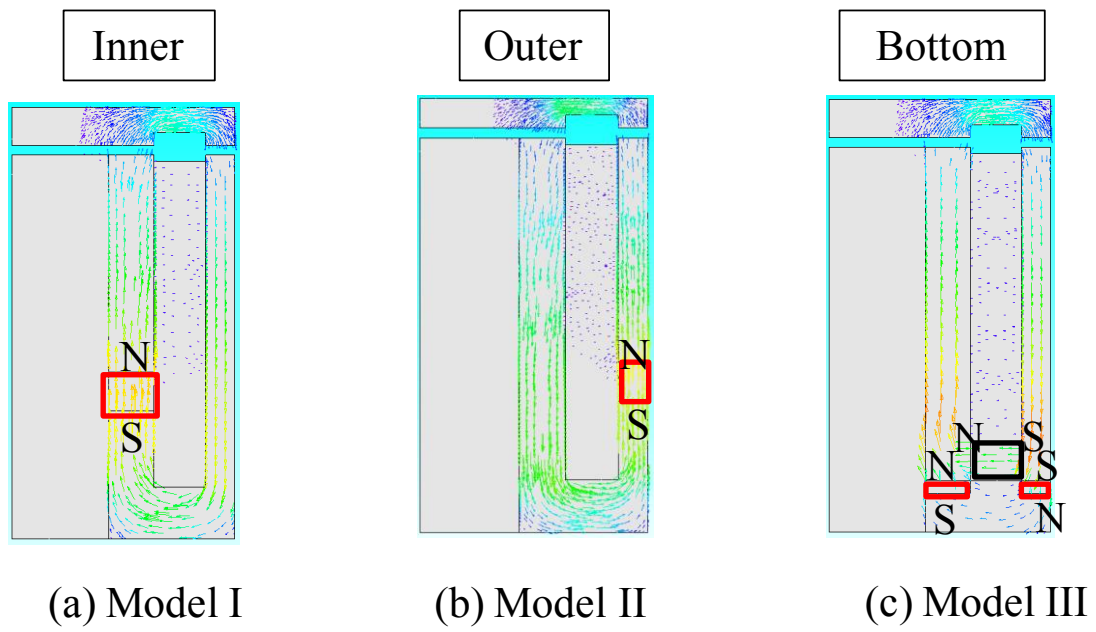
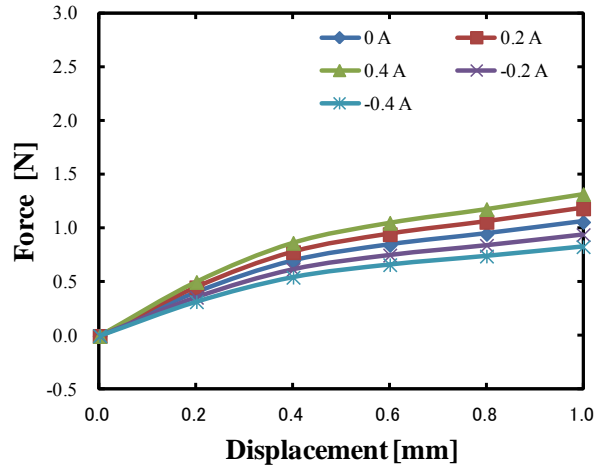
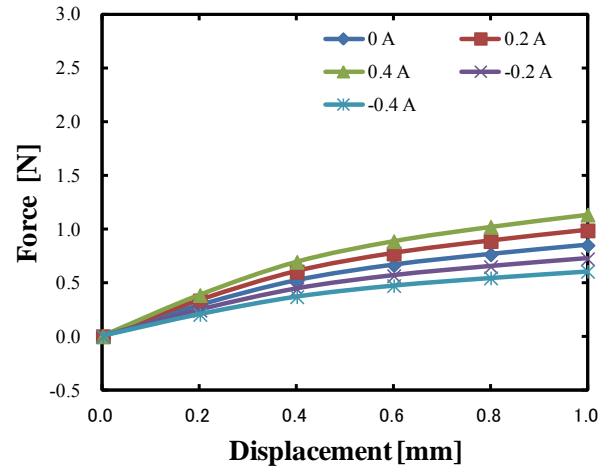


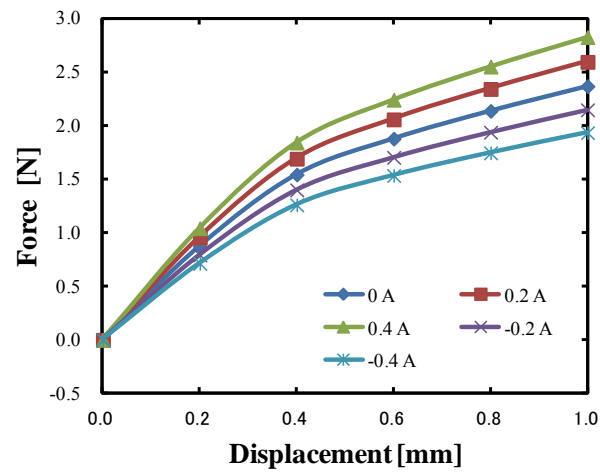
Fig. 4.4 Analytical model for various permanent magnet.



(a) Model I



(b) Model II



(c) Model III

Fig. 4.5 Relationship between displacement and force.

また、提案した磁気軸受はステータの内環部及び外環部とロータディスクの向かい合う面の直径は同じだったが、ロータディスクの寸法を変えることで復元力の強化を図る。上述と同じく本論文で提案した磁気軸受を第一モデルとして (Fig. 4.7(a)), ステータの内環部及び外環部より径の大きなモデルを第四モデル (Fig. 4.7(b)), 径の小さなモデルを第五モデル (Fig. 4.7(c)) とする。目標浮上位置での磁路と半径方向に 1.0mm 変位させた時の半径方向復元力について磁気解析を行う。

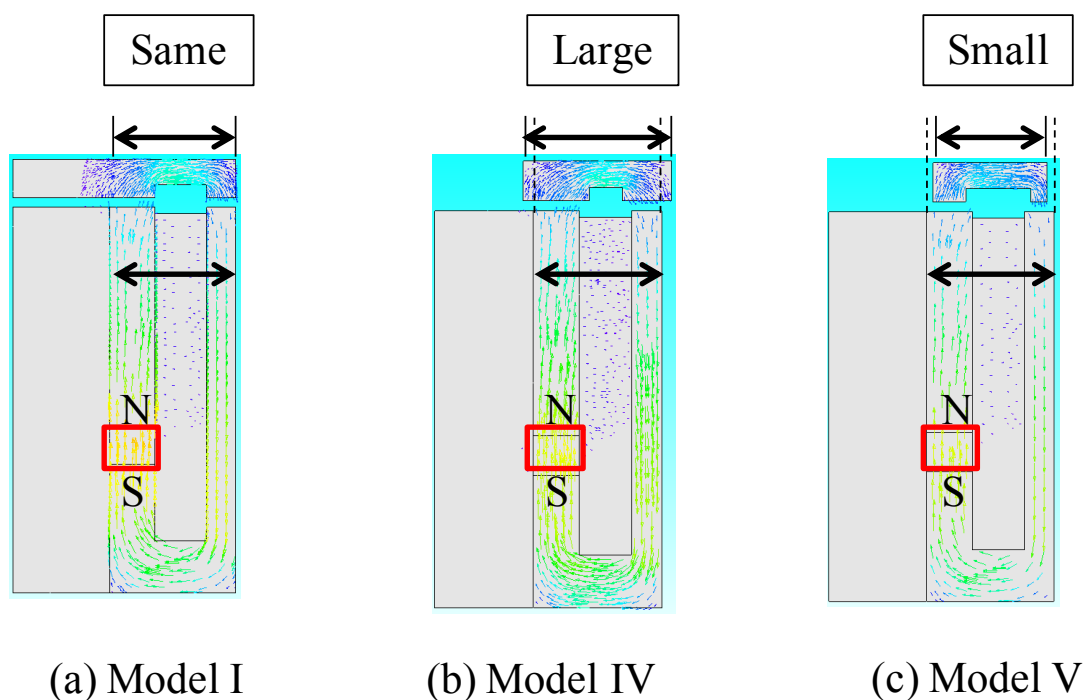
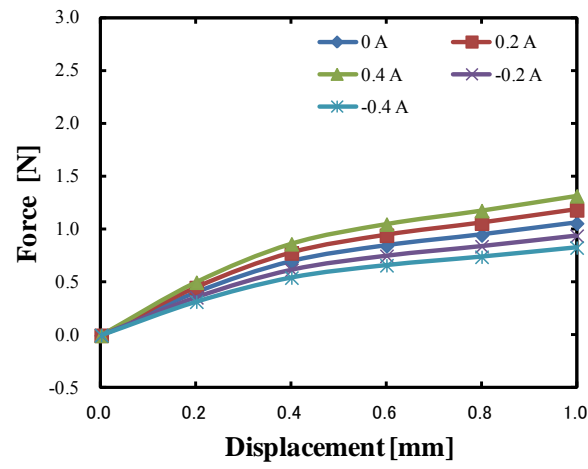
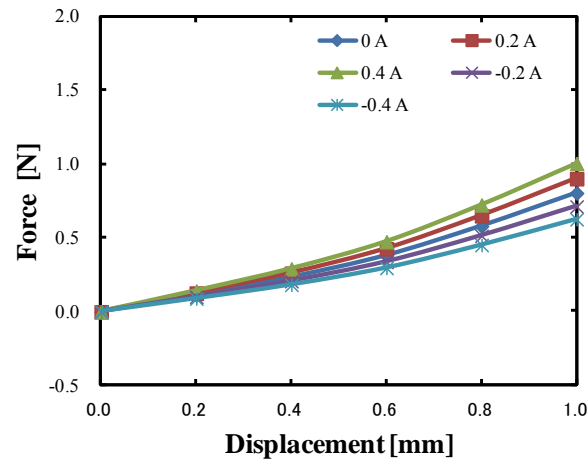


Fig. 4.7 Analytical model for diameter of rotor disk.

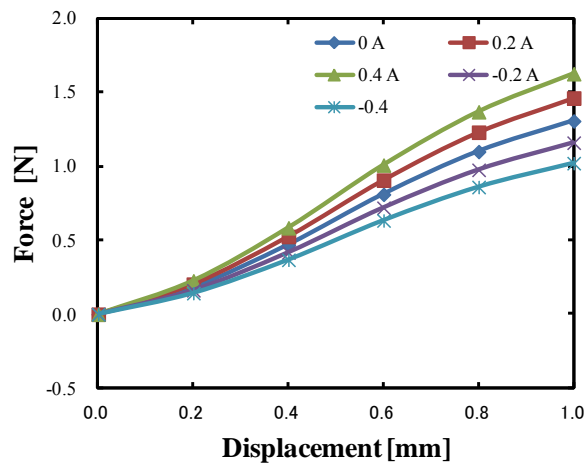
Fig. 4.8 に I, IV, V モデルの半径方向変位時の復元力磁気解析結果を示す。Fig. 4.8 より、モデル V が最も高く、次いでモデル I, モデル IV が最も低い結果となっていることがわかる。



(a) Model I



(b) Model IV



(c) Model V

Fig. 4.7 Relationship between displacement and force.

第 5 章 結言

5.1 まとめ

磁気軸受について、低コスト化、装置全体の小型化を実現するため、軸方向 1 自由度のみを浮上制御する小型の軸流型磁気軸受の構造を提案した。提案した磁気軸受のロータは溝が設けられたロータディスクとロータディスクを繋ぐロータシャフトから構成される。ステータは内環部と外環部のからなるシリンダー状の電磁石（浮上コイルを含む）とリング状の永久磁石から構成される。提案した磁気軸受について磁気解析ソフトを用いて軸方向、半径方向、傾き方向への変位時の復元力の磁気解析を行った。磁気解析の結果、軸方向に関しては 21 N/A の力係数が得られることが確認できた。半径方向に関しては電流を変化させても復元力が殆ど変わらないことを確認した。傾き方向に関しては ± 0.6 deg までの傾きまでは復元力が働くことを確認した。

磁気解析の結果を基に磁気軸受を作製し、軸方向吸引力を測定した。測定の結果 17.72 N/A の力係数を得た。次に軸方向への浮上制御を行った。浮上制御には一組の変位センサと PD 制御を用いた。制御ゲインは試行錯誤的に選定し、P ゲインは 3.14 A/mm, D ゲインは 0.13 As/mm とした。浮上制御時に擬似的にインパルス信号、ステップ信号を外乱として入力し、応答評価を行った。振幅 0.25 mm のインパルス信号に対しては静定時間が 0.05 sec と良好な即応性を確認した。振幅 0.10 mm のステップ信号に対しては静定時間が 0.01 sec と良好な即応性を確認した。

軸方向制御に関して良好な即応性を確認できたので、浮上回転実験を行った。実験の結果、最大 350 rpm まで回転させたが、軸方向変位は 0.2 mm 以下と安定した浮上制御を行っていることを確認した。

半径方向の受動支持方法について、磁気カップリングの実測と軸受構造の磁気解析を行った。磁気カップリングはゴム磁石が単極である場合、着磁方向長さが長くなる z 軸方向着磁のものを採用することで、高い復元力を得られると考えられる。軸受構造については、永久磁石は電磁石による制御磁束の磁気抵抗とならない構造とし、ロータ外径をステータ外径よりわずかに小さくすることで高い復元力を得られることがわかった。

5.2 今後の課題

本研究ではロータとケーシングの隙間を小さくし、回転駆動力の高効率化を図るため、中空軸構造を採用したが、中空軸構造を活かせる回転駆動構成を提案することができなかった。また、中空軸構造の有用性も確認することができなかった。そのため、中空軸構造を活かせる回転駆動構成を行い、各種実験を行うことでその有用性の確認を行う必要がある。

本研究では軸方向のみ能動制御を行い、半径方向、傾き方向は磁気軸受の構造によって受動的に支持を行った。しかし、十分な受動支持が行えていないため、十分な復元力を得られず、変位が大きくなってしまった。そのため、半径方向及び傾き方向の変位に対して第4章で述べた磁気カップリングや軸受構成の検討を再度行い、十分な復元力を得られることを確認するとともに、中空軸構造による低回転での危険速度を超えて、より高速での回転駆動評価を行う必要がある。

参考文献

- [1] 転がり軸受の基礎知識, 機械要素ザ・バイブル, http://www.labnotes.jp/pdf/labnotes_bearing.pdf
- [2] すべり軸受の基礎知識, 機械要素ザ・バイブル, http://www.labnotes.jp/pdf/labnotes_bush.pdf
- [3] 樋口俊郎, 岡宏一, 菅原宏, 磁気軸受機構による非接触関節を持つクリーンルーム用ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 8, No. 5, pp. 29-36, 1990.
- [4] 国立循環器センター, ここまできた人工心臓, <http://www.ncvc.go.jp/cvinfo/pamphlet/heart/pamph42.html>
- [5] 進士忠彦, 磁気浮上式補助人工心臓の小型化技術, 日本機械学会誌, Vol. 112, No. 1088, pp. 572-575, 2009.
- [6] 津久井宏行, 植込み型補助人工心臓時代の本格的幕開け, 人工臓器, Vol. 39, No.3, pp. 150-153, 2010.
- [7] 久保省蔵, 2 種類の液体で満たされた分割された中空回転軸の動的不安定に関する研究, 九州工業大学博士学位論文, pp. 1-85, 1991.
- [8] 佐藤勇一, 森井茂樹, 長嶺拓夫, 石川裕亮, 液体を内蔵する中空回転体の安定性 (液体が遠心力によって排出される影響), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 71, No. 702, pp. 5-11, 2005.
- [9] 黒須寛秋, 増澤徹, 加藤綾子, 小沼弘幸, 柿原功一, 4 軸制御型磁気軸受を用いたクリーンポンプの研究開発, 日本 AEM 学会, Vol. 17, No. 2, pp. 309-316, 2009.
- [10] S. M. Yang, M. S. Huang, Design and Implementation of a Magnetically Levitated Single-Axis Controlled Axial Blood Pump, IEEE transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 6, pp. 2213-2219, 2009.
- [11] 水野毅, ハネス・ブロイレル, 田中博昭, 橋本秀紀, 原島文雄, 上山拓知, センサレス磁気軸受のターボ分子ポンプへの応用, 生産研究, Vol. 46, No. 12, pp. 686-689, 1994.
- [12] 田鍾業, ハネス・ブロイレル, 樋口俊郎, 磁気浮上システムのオートチューニングレギュレータ, 生産研究, Vol. 46, No. 12, pp. 690-693, 1994.
- [13] 廣瀬健太郎, 小森望充, 坂井伸朗, 浅海賢一, 中空軸を持つ一軸浮上制御磁気軸受の

- 提案と非接触回転駆動への応用, 産業応用工学会誌, 3 巻, 1 号, pp. 18-23, 2015.
- [14] K. Hirose, M. Komori, N. Sakai, K. Asami, Application of one axis controlled magnetic bearing with a hollow shaft to non-contact rotation drive, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 11, p. 4, 2015.
- [15] 水貝智洋, 反発型磁気軸受で支持される回転軸系の危険速度通過のための振動解析と制振, 名古屋大学博士学位論文, pp. 1-150, 2014
- [16] Backers, F. T., A Magnetic Journal Bearing, Philips Technical Review, pp. 232-238, 1960.
- [17] J. P. Yonnet, Passive Magnetic Bearings with Permanent Magnets, IEEE Transaction on Magnetics, pp. 803-805, 1978.
- [18] J. P. Yonnet, Permanent Magnet Bearing and Couplings, IEEE Transaction on Magnetics, pp. 1169-1173, 1981.
- [19] J. P. Yonnet., G. Lemarquand, S. Hemmerlin, E. O. Rulliere, Stacked Structures of Passive Magnetic Bearing, Journal of Applied Physics, pp. 6633-6635, 1991.
- [20] B. Paden, N. Groom, J. F. Antaki, Desing Formulas for Permanent-Magnet Bearings, Transaction of the ASME, Journal of Mechanical Design, pp. 734-738, 2003.
- [21] 増澤徹, 佐々木瑛祐, 永久磁石と電磁石を併用するハイブリッド磁気軸受けの新しい構造を提案, JST・首都圏北部4大学発新技術説明会, pp. 1-24, 2010.

謝辞

本研究に行うにあたり，九州工業大学 工学部 小森望充教授に多大なるご指導，ご鞭撻を賜りました。論文の完成は，ひとえに先生のご指導のおかげであり，ここに深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたっては本学 奥山圭一 教授，本学 平木講儒 教授，本学 坂井伸朗 准教授，本学 浅海賢一 准教授に細部にわたってご査読，ご叱正をいただきました。ここに紙面を借りて深謝いたします。

最後に，本学の諸先生，諸先輩，同僚，大学院生ならびに小森・坂井研究室の諸氏に感謝いたします。